

**Система от евристични
средства
за функционално опериране
с базови електронни схеми**

Кирил Мечков

СЪДЪРЖАНИЕ

1. УВОД

1.1. Предпоставки за изграждане на системата от евристични средства (5)

1.2. Проучване на нивото (7)

1.2.1. Инженерна евристика (7)

1.2.2. Методология на обучението по схемотехническите дисциплини (10)

1.2.3. Конкретни разработки в областта на схемотехниката (11)

2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕВРИСТИЧНА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ФУНКЦИОНАЛНО ОПЕРИРАНЕ С ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

2.1. Функционален анализ (разбиране) на електронните схеми (15)

2.1.1. Защо са скрити идеите на електронните схеми (15)

2.1.2. Технология на разбирането на електронните схеми (16)

Етап I: Анализирание на структурата на схемата (17)

Етап II: Анализирание на действието на схемата (21)

Етап III: Разпознаване на известни базови принципи (29)

Етап IV: Търсене на сходна идея в други схеми или сходни житейски ситуации (30)

Етап V: Обобщаване на получената идея в нов схемотехнически принцип (30)

2.2. Функционално представяне (преподаване) на електронни схеми (33)

2.2.1. Как да представяте схемите с помощта на евристични средства (33)

2.2.2. Технология на представянето на електронните схеми (33)

Етап I: Представяне на структурата на схемата (33)

Етап II: Демонстриране на действието на схемата (39)

2.3. Функционален синтез (изобретяване) на електронни схеми (42)

2.3.1. Видове изобретения (42)

2.3.2. Технология на изобретяването на електронните схеми (42)

Етап I: Изобретяване на структурата на схемата (43)

Етап II: Изследване на действието на схемата (49)

Етап III: Обобщаване на резултатите (49)

3. РАЗРАБОТВАНЕ НА НАБОР ОТ ЕВРИСТИЧНИ СРЕДСТВА ЗА ФУНКЦИОНАЛНО ОПЕРИРАНЕ С ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

3.1. Колекция от базови евристични схемотехнически принципи (51)

3.1.1. Модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез включване на допълнителен пропорционален електрически източник (52)

3.1.1.1. Модифициране на импеданс чрез включване на източник на напрежение (основна теорема на Милър за напреженията (52)

1. Класическо представяне (52)
2. Разкриване на базовата идея на теоремата на Милър чрез функционален анализ (54)
3. Нова интерпретация на теоремата на Милър (56)
 - А. Виртуално увеличаване на импеданс чрез изваждане на напрежение (57)
 - Б. Виртуално намаляване на импеданс чрез прибавяне на напрежение (64)
4. Обобщаване на постановката на Милър чрез динамизация (74)

3.1.1.2. Модифициране на импеданс чрез включване на източник на ток (дуална теорема на Милър за токовете (77)

1. Класическо представяне (77)
2. Функционално разкриване на базовата идея на дуалната теорема на Милър (77)
3. Нова интерпретация на дуалната теорема на Милър (78)
 - А. Виртуално намаляване на импеданс чрез изваждане на ток (78)
 - Б. Виртуално увеличаване на импеданс чрез прибавяне на ток (80)

3.1.2. Модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез динамизация на импеданса (87)

3.1.2.1. Виртуално намаляване на съпротивление (87)

3.1.2.2. Виртуално увеличаване на съпротивление (94)

3.1.3. Изграждане на електронни схеми чрез взаимодействащи си електрически източници (102)

3.1.3.1. Конфликт между източници на напрежение (104)

3.1.3.2. Конфликт между източници на ток (112)

3.1.3.3. Взаимопомощ между разнородни електрически източници (117)

3.1.4. Други принципи за изграждане на електронни схеми (121)

3.2. Разработване на евристични методи за визуализиране на електрическите величини в електронните схеми (122)

3.2.1. Визуализиране на напрежения (122)

3.2.1.1. Потенциални стълбчета (122)

3.2.1.2. Потенциални диаграми (124)

3.2.2. Визуализиране на токове чрез токови контури (126)

3.2.3. Представяне на действието на схемите чрез наслагване на множество картини на потенциалите и токовете (126)

3.2.4. Визуализиране на напреженията и токовете в онлайн режим (127)

3.2.5. Визуализиране на работната точка чрез насложени волт-амперни характеристики - графо-аналитично представяне, метод на товарната права (129)

3.3. Разработване на мисловни средства за обработване на електрическите схеми (132)

3.3.1. Разкриване и умишлено въвеждане на причинно-следствени връзки в действието на изследваните схеми (132)

3.3.2. Поставяне на мястото на изследваното устройство (емпатия) (132)

3.3.3. Използване на аналогии за опериране с електронните схеми (133)

3.4. Разработване на набор от технически средства за реализиране на евристичния подход в схемотехниката (136)

3.4.1. Модулна микрокомпютърна система за провеждане на учебни лабораторни експерименти МИКРОЛАБ (136)

3.4.2. Вградена микрокомпютърна система за провеждане на учебни лабораторни експерименти ДИДАЛАБ (145)

3.4.3. Универсален модул за изследване на електронни елементи (148)

3.4.4. Дидактическа среда за провеждане на учебни лабораторни експерименти (152)

3.4.5. Нетрадиционни учебни лабораторни експерименти (156)

4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕВРИСТИЧНИЯ ПОДХОД В СХЕМОТЕХНИКАТА (161)

4.1. Евристичен курс по схемотехника (161)

4.2. Уеб сайт „Как да разбираме, представяме и изобретяваме електронни схеми (166)

4.2.1. Същност (166)

4.2.1. Реализация (166)

4.2.1. Структура (167)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (174)

5.1. Резултати (174)

5.2. Бъдещо развитие (174)

5.3. Приноси (175)

5.4. Благодарности (176)

6. ЛИТЕРАТУРА (178)

6.1. Публикации на автора (178)

6.2. Цитирани източници в работата (180)

*Въображението е по-важно от знанието,
защото знанието е ограничено.*

А. Айнщайн

1. УВОД

1.1. ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА СИСТЕМАТА ОТ ЕВРИСТИЧНИ СРЕДСТВА

В основата на електронните устройства стоят ясни и прости фундаментални идеи, родени с много въображение и ентузиазъм от изобретателни хора. Времето обаче безмилостно затрупва тези бисери на човешката мисъл с пластове от ненужна информация и трябва дълго да ровим в шлаката на посредствеността за да ги открием [1].

1. Защо идеите, залегнали в електронните схеми, остават скрити?

Главната причина е, че класическият подход се опитва да обясни качествените явления чрез количествени методи. Математическите модели, използвани от формалните методи, описват обектите в един силно синтезиран, компактен и удобен предимно за запис и манипулиране вид. Те скриват структурата на устройствата, причинно-следствените връзки в тях и връзката “структура-функция”. Следователно, математическите уравнения не могат да служат като изходна точка за изучаване, конструиране и изобретяване на електронните устройства, защото разкриват количествените, но скриват качествените им характеристики. Те трябва да влязат в действие след като структурата на устройството е готова и остава да се определят точните стойности на параметрите. Математическият модел, описващ даден феномен или действието на устройството, се явява последно звено в тази идейна последователност.

2. Как да оперираме с електронните схеми?

Схемотехниката е повече изкуство, отколкото наука. Изобретяването на нови електронни схеми е резултат преди всичко от прилагането на човешката фантазия и интуиция, отколкото от използването на формално мислене. Качествените страни на схемите трябва да се изследват с качествени методи, а количествените им страни – с количествени методи. Първо трябва да се приложат качествени методи за разбиране, обясняване и синтезиране на схемите и едва след това да се използват количествени методи за анализиране и оразмеряване на схемите. Ние, хората, трябва първо да построяваме и дори да преизобретяваме схемите като използваме човешката си интуиция, въображение и емоции и чак след това да определяме точните стойности на параметрите, да анализираме щателно схемните решения чрез формални методи. Така, следвайки интуицията си на първия етап от срещата си с новите схеми, ние ще фокусираме повече на причинно-следствените връзки, отколкото на формалните доказателства чрез решаване на математически уравнения.

1.1. ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА СИСТЕМАТА

3. Каква необходимост съществува в схемотехниката?

Реализирането на евристичния подход в схемотехниката изисква първо да се извлекат индуктивно достатъчно на брой базови схемотехнически принципи, които да се организират в една иерархична система и след това да се приложат дедуктивно за целите на анализа и синтеза. За да се осъществят тези задачи, трябва да се разработи и набор от специфични евристични средства [2] за обработване на схемите. Създаването и поддръждането на евристичните средства в една иерархична система ще позволи не само да се анализира задълбочено действието на електронните схеми чрез разкриване на взаимната им връзка, да се представят убедително те пред студентите, но и да се създават, синтезират, псевдоизобретяват и дори наистина изобретяват съвършено нови устройства. Наборът от тези евристични средства ще оформи една дидактическа среда, която стимулира продуктивното мислене на студентите и учениците и ги направлява в процеса на изучаването на схемните феномени. В условията на тази среда може да се реализира една нова образователна технология, основана на евристичния подход.

4. Каква е предисторията на настоящата работа?

Тази разработка има дълга предистория. Началото е поставено през 1987 г. със създаването на едно удачно за целите на учебната дейност техническо устройство – система МИКРОЛАБ [3]. След внедряването му в учебния процес, то прераства в автоматизиран начин за провеждане на учебни лабораторни експерименти - образователна технология МИКРОЛАБ, в който вземат участие студенти от няколко випуска. В следващите години се натрупва опит в изследването на електронните схеми и авторът постепенно насочва вниманието си към разкриването на феномените, върху които са базирани електронните схеми.

5. Каква е целта на настоящата работа?

Авторът си е поставил като най-обща цел в настоящата работа да *събере, обобщи и класифицира в една иерархична система натрупаните евристични принципи, техники и други средства за манипулиране на електронните схеми*. За реализирането на тази цел са набелязани конкретни задачи:

- ✓ *да се разработи евристична технология за функционално опериране с електронните схеми, състояща се от три главни части - разбиране, преподаване и изобретяване*
- ✓ *да се създаде набор от необходимите евристични средства за реализирането на тази технология*
- ✓ *да се приложи евристичната технология в схемотехниката за целите на техническото образование*

1.2. ПРОУЧВАНЕ НА ПОДОБНИ РАЗРАБОТКИ

Настоящата работа представлява съвкупност от най-обща *методология на схемотехниката* (разбиране, представяне и изобретяване на схемите), иерархична система от *евристични средства* за опериране с електронните схеми и *прилагането* ѝ върху конкретни електронни схеми. В този смисъл тя е една уникална разработка, на която е трудно да бъде намерен пълен аналог; затова са издирени сродни разработки в различни области на човешкото познание, които наподобяват някои от отделните ѝ съставни части.

1.2.1. Инженерна евристика

Наченките на методи за техническо творчество трябва да се търсят в най-ранните етапи от историята на материалната култура, когато човек преминава от инстинктивно към емпирично изобретателство и си поставя за цел съзнателно да твори нови и да подобрява съществуващите технически средства. Идеята за формиране на специална наука за творческото мислене занимава най-напред умовете на такива прочути антични математици като Архимед (287 – 212 г. пр.н.е.), Пап Александрийски (300 г. пр.н.е.) и др. [4]. Архимед нарича отделните похвати, правила и методи, водещи към нови открития в науката, „евристични разсъждения”. Някои автори приписват на Архимед дори авторството на термина „евристика” като произведен на известното негово възклицание „Еврика!”.

В зависимост от степента на формализация, евристичните методи за научно творчество могат да бъдат разделени на две големи групи, наречени условно *стихийно евристични* и *системно евристични*. Първите се опират на подсъзнанието и интуицията на човека (класически примери са *мозъчната атака* и *синектиката*), а вторите – на принципите на логическата обработка на информацията (например, *морфологичен анализ*, *контролни въпроси*, *алгоритъм за решаване на изобретателски задачи АРИЗ* и др.). Най-близки до настоящата работа са интуитивните евристични методи от първата група.

Мозъчна атака (brainstorming). Това е един от най-популярните методи за активиране на творческия процес. Предложен е през 1953 г. от американския учен Алекс Осборн [5] с написването на книгата му „Приложно въображение” [6]. Методът има колективен характер и е основан на творческото сътрудничество на членовете на група от хора. Изобретателската задача се решава последователно от две групи участници – *генератори на идеи* и *експерти*. В първата група се включват



само хора с богато и ярко изразено творческо въображение, а във втората – специалисти с аналитична и критична нагласа на ума.

По време на „атаката“ (заседанието на групата) могат да се изказват всевъзможни идеи, включително и явно грешни, дори абсурдни, необосновани или пък шеговити, като при това е забранена всякаква критика под каквато и да е било форма. След това генерираните идеи се анализират задълбочено и внимателно от експертите.

Синектика (synectics). Този метод е един от най-ярките представители на интуитивните методи, сравнително най-популярен и с най-големи възможности от тази група. Самата дума „синектика“ е неологизъм, който може да се преведе като „съвместимост на разнородни елементи“ или „свързване на различни и привидно несвързани елементи“. Основоположник на синектиката е американският изследовател Уилям Гордън в сътрудничество с Джордж Принц, които основават фирмата Synectics Inc. (в момента Synecticsworld) през 1960 г. [7] През 1961 г. той издава книгата си „Синектика“ [8], която и до днес остава един от малкото достоверни източници за метода.

Според Гордън, синектическото изследване предполага три главни допускания:

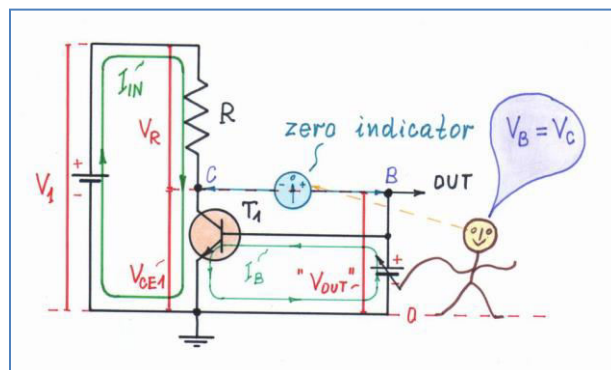
- Творческият процес може да бъде описан и преподаван.
- Актовете на изобретателство в областта на изкуството и науката са аналогични и са управлявани от еднакви по природа психични процеси.
- Индивидуалното и груповото творчество са аналогични.

Методът предлага колективно нетрадиционно обсъждане на поставените задачи чрез усилията на група от хора с цел да се получат възможните решения. За разлика обаче от мозъчната атака, в синектиката не се обръща внимание на толкова голямо количество идеи, а се търси развитието на две-три идеи. Гордън набляга върху важността на „метафоричния процес да прави познатото непознато и непознатото – познато“. Емоциите се поставят над интелекта и ирационалното – над рационалното. Поради това се залага на широкото прилагане на аналогии (лични, преки, символични и фантастични) и асоциации, като се разчита на спонтанната активност на мозъка, за да се превърнат неосъзнатите хрумвания в реални осезаеми възможности.

Особено внимание трябва да се обърне на *личностната аналогия*, защото тя е застъпена широко в настоящата работа. Известна е още като *емпатия* [9]. В най-общ вид означава отъждествяване на личността на един човек с личността на друг, проникване в начина на мислене на друго лице, поставяне в положението на друга личност. При синектиката търсещият решението човек се отъждествява (уподобява) с усъвършенствания обект. Участниците-синектици трябва да си представят, че самите те са обекта, избран по аналогия, и в тази странна роля да расъждават устно за своето състояние. Така например, ако се обсъждат проблеми на

машиностроенето, синектикът се слива с дадения детайл, механизъм или машина. Ако това са проблеми на електронни схеми, синектикът би трябвало да се превъплъти в ролята на електронните елементи (транзистори, операционни усилватели и др.).

Интерес представлява и *фантастичната аналогия*, също широко използвана в настоящата работа. Тя се основава на въвеждането на фантастични същества (например, малки човечета - подобно на демона на Максвел), които изпълняват необходимите действия според условията на задачата.



Така, в крайна сметка методът осигурява раждането на нови идеи при повишена интензивност на творческия процес. Както и при мозъчната атака, тези идеи по-нататък подлежат на селекция и обработка.

Обходно мислене (lateral thinking). Методът е предложен през 1967 г. от Едвард де Боно [10]. Представлява система от техники за преодоляване на психологическата инерция, предотвратяване на преждевременното формулиране на идеята в нейния зародиш, „изкрystalизиране“ на идеята и окончателното ѝ формулиране. Особено интересни са изследванията му за негативното влияние на специализираните термини върху творческия процес, ползата от визуалното мислене и начините за стимулиране на възникването на нови идеи.

Алгоритъм за решаване на изобретателски задачи. През 60-те години, чрез анализ на повече от 40000 изобретения, Хенрих Алтшулер предлага система от средства, подпомагащи изобретателското творчество, която нарича *теория за решаване на изобретателски задачи* (ТРИЗ). Тя спада към системно-евристичните средства, които не са обект на настоящата работа, но се споменава в обзора с цел пълнота на изложението. Целта е да се облекчи решаването на изобретателските задачи чрез развиване на творческото въображение и мислене, като процеса се формализира чрез изключване на елементите на случайност [11]. Главни елементи на ТРИЗ са алгоритъмът за решаване на изобретателски задачи - АРИЗ [12] и 40-те принципа за разрешаване на технически противоречия [13], както и формулирането на концепциите на *техническото противоречие* и *идеалния краен резултат*.

ТРИЗ е приложена първоначално в областта на машиностроенето, а по-късно е разпространена и в други области на техниката, включително и в електрониката. Разработената в настоящата работа колекция от базови евристични схемотехнически принципи (гл. 3.1) може да

се разглежда като една конкретна схемотехническа реализация, подобна на принципите за разрешаване на технически противоречия, предложени от Алтшулер в областта на машиностроенето. Може да се каже, че ТРИЗ не е строга научна теория, а по-скоро абстрактно обобщение на изобретателския опит.

1.2.2. Методология на обучението по схемотехническите дисциплини

Съществена част от настоящата работа е посветена на представянето (обясняването, преподаването) на електронните схеми. Затова в обзора е направен преглед на подобни разработки.

Функционален подход. Въведен е за пръв път от Боян Лалов в методиката на преподаването в областта на електротехниката, електрониката, автоматиката и информатиката като една алтернатива на класическия *аксиоматичен подход* [14]. Функционалният подход поставя на преден план обстойното изследване на функциите и поведението на градивните елементи на дадено устройство или схема, с помощта на широк спектър от примери, експерименти и задачи, като едва след това тези градивни елементи се включват в по-големи единици, възли, агрегати, които също подлежат на такова обстойно изучаване и т.н. Така авторът разчита не само на излагането на принципните положения на дадена теория, но в не по-малка степен на интерпретацията на тези принципи в многобройни примери. По този начин учащите могат да навлязат чрез широк спектър от задачи и ситуации в природата и функционирането на устройството, да формират с помощта на сетивния си опит психически модели, отразяващи под формата на динамични образи поведението на отделните подсистеми. От тази гледна точка „обучението се състои в създаване и опериране с разнообразни пространствено-времеви структури в реален и виртуален план (под опериране във виртуален план авторът разбира както оперирането с компютърни симулационни модели, така и мисленото опериране с вътрешно-психически модели на обектите).

Давайки предимство на оперирането със структури, функционалният подход има значителни предимства пред класическия аксиоматичен подход. Според автора, обобщеното представяне на знанията пред учащите като система от принципи и закони, трябва да се предшества от предварителна практическа работа, при която се съобщава, под формата на кратки инструкции и примери, само минимума за решаване на конкретната задача „атомарни“ отношения. Оттук следва, че едва в края на занятието знанията ще се обхващат и осмислят като доминиращи принципи и закономерности. А това означава, че „общите закономерности следва да се разкриват чак когато учащите се „извисяват“ над усвоените сензомоторни отношения, които са експериментално проиграни в ситуациите и са създали устойчиви навици и умения”. Накратко, функционалният подход представлява „обучение чрез опериране със структури”.

Сенсуална наука. Рут-Бърнстийн смята, че широкоразпространената представа на хората за научните области като извънредно логични дисциплини, където научните работници постигат обективно разбиране на света чрез наблюдения, дедукция и експериментална проверка, не може да обясни как се раждат най-оригиналните идеи у големите мислители [15]. Според тази обичайна представа ученият се схваща като една „машина“ за логически изследвания: той извършва емпирически изследвания, изгражда и подлага на проверка хипотези, прави ясни умозаклучения. Би могло да се твърди, че целта на науката е да елиминира личния, интуитивен, субективен елемент, от обективния анализ на света. Тази картина на науката игнорира процесите, чрез които се постигат прозренията. Описанията на „механизма“ на откритията от самите учени убеждават Бърнстийн, че въображението и емпатията, даването на свобода на емоциите и сетивните възприятия, са също толкова важни за науката, колкото и за изкуството.

Изключително ценна е мисълта на автора за ролята на емпатията: „Чрез един акт на въображение наблюдателят се идентифицира с предмета на изследването и се посвещава на него... Участието на въображението превръща научното изследване в един вид драма, в която ученият играе главната роля”.

Бърнстийн прави заключението, че обичайната научна подготовка е недостатъчна сама по себе си за формирането на творчески индивидуалности в науката; за това е необходимо нещо повече от добри математически и описателни умения. „Само едно чувствително въображение може да оживи стерилните, неподвижни символи и думи, посредством които учените са принудени да изразяват своите прозрения”.

За целите на преподаването той си представя една образователна среда, в която оралният, кинестетичният и визуалният опит са тясно свързани с преподаването на теорията. Забележителна е мисълта му за ролята на аналозите: „Да се превеждат трудноразбираемите теоретични уравнения на езика на метафорите и битовите аналогии би било едно начинание, достойно за включване в „умствените гимнастически упражнения“ на Айнщайн. Като заключение казва: „За да мисли, ученият първо трябва да се научи да чувства”.

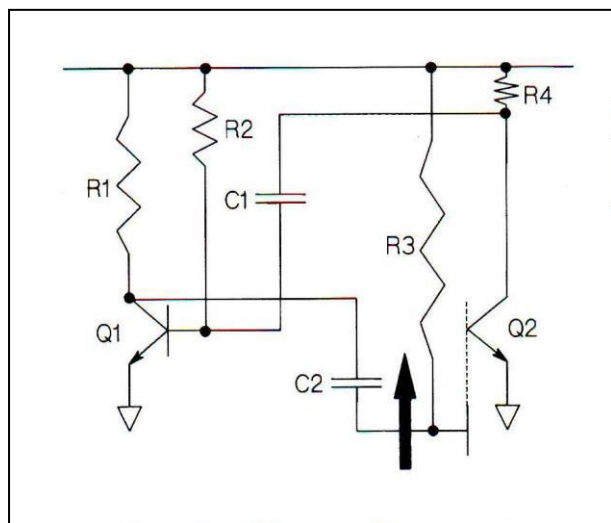
1.2.3. Конкретни разработки в областта на схемотехниката

1.2.3.1. Техники за визуализиране на електрически величини

В настоящата работа е широко застъпено визуализирането на недостъпните за човешките сетива електрически величини с помощта на напрежителни стълбчета и токови контури. Подобни техники са използвани и преди това; ето някои от тях.

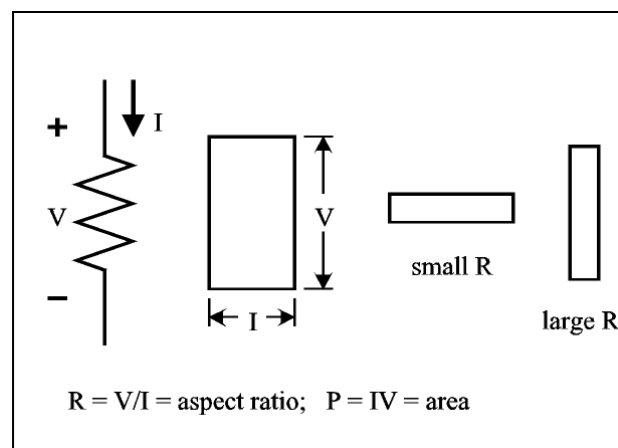
Визуализиране чрез манипулиране на изображенията на схемите. Някои интересни евристични похвати за изследване на електронни схеми с цел разбиране на действието им са предложени от Hornak [16]. Те се състоят в геометрично представяне и манипулиране на

схемите (разтягане, преместване и завъртане), като геометричните размери на елементите и частите на схемата са пропорционални на съответните напрежения. Например, в популярната схема на транзисторен мултивибратор (фигурата вдясно), манипулирана по този начин, общата точка между колектора на транзистора Q2 и колекторния му резистор R4 е вдигната високо горе, защото потенциалът на колектора е висок. На основата на тази идея са разработени програмни продукти за представяне на електронните схеми като триизмерни изображения, съответстващи на напреженията [17].



Всъщност тази идея не е нова и отдавна се използва по един или друг начин от техниците с добре развито техническо въображение за мислено представяне на действието на схемите. Недостатък на метода е това, че схемите и електрическите величини са твърдо слети в едно цяло и не могат да бъдат отделени.

Визуализиране на електрически величини чрез „волт-амперни карти“. Подобна на горната е и идеята за визуализиране на електрическите величини чрез „волт-амперни карти“, където на всеки елемент се съпоставя специфично изображение под формата на правоъгълник [18]. Едната страна на правоъгълника отговаря на напрежението (пада), другата – на тока, а площта – на мощността. Недостатък на метода е, че схемите и волт-амперните карти са отделени една от друга.



1.2.3.2. Интуитивният подход в популяризирането на схемите

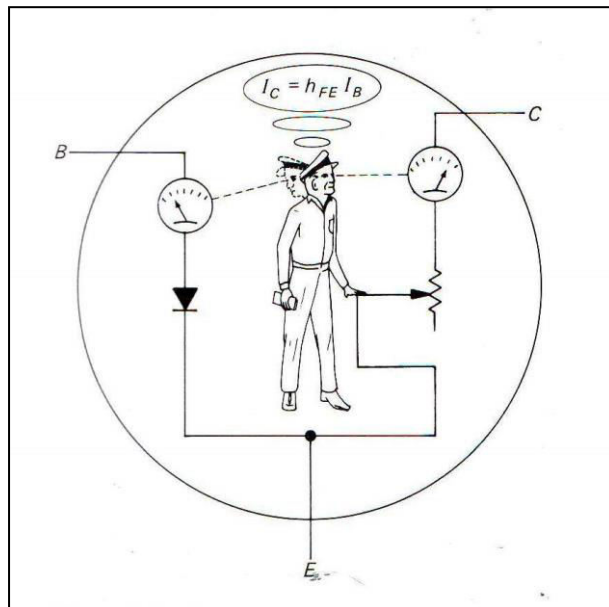
Макар и рядко, интуитивният подход и елементи на евристичния подход са прилагани от редица автори в стремежа им да популяризират електрониката и да направят понятни за читателя базовите идеи на схемотехниката. Ето най-известните от тях.

Е. Айсберг. Френският автор Е. Айсберг написва в началото на 60-те години знаменитата си книга *Радиото ли? Че то е много просто!* [19]. Тя е богато илюстрирана, а отстрани на страниците са поместени множество илюстрации на аналогии от живота. Интересното е, че книгата е написана под формата на занимателни диалози между две лица – „знаещия“ Наум и

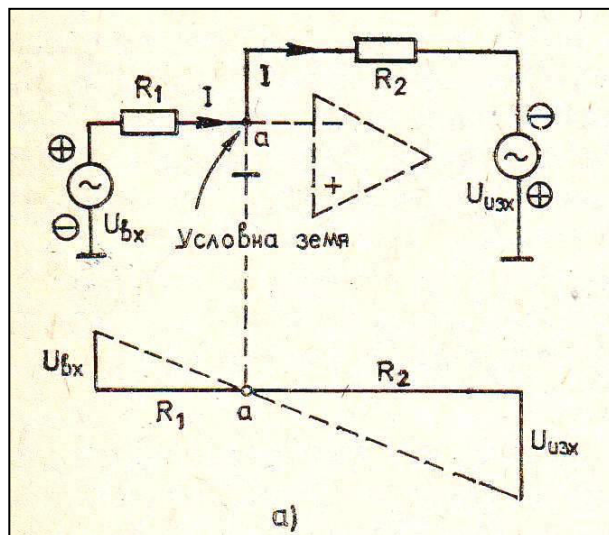
„незнаещия” Ванчо. Въпреки, че основната цел на автора е да запознае читателя с идеите на радиото, той е разгледал фундаментални идеи на електротехниката и електрониката, някои от които са актуални и до днес. Стилът му на изложение е жив и занимателен и с лекота обяснява нещата. Например, знаменити са хидравличните му аналогии на кондензатор и трептящ кръг.

Ж. Йомишен. Делото на Айсберг е продължено от неговия последовател Ж. Йомишен в областта на промишлената електроника, автоматика и електронните измервания. Той написва *Електрониката ли? Нищо по-просто!* [20] в края на 60-те години, като успешно имитира стила на Айсберг. Йомишен разкрива много успешно базови идеи на схемотехниката, като в някои отношения надминава своя учител.

Паул Хоровиц. Паул Хоровиц (като основен автор) написва през 1980 г. знаменитата си книга *Изкуството на схемотехниката*, която става бестселър в областта на популяризирането на схемотехниката [21]. Авторът успява да изложи в шеговита форма, с множество илюстрации (като тази вдясно), забавни въпроси и упражнения, основни принципи на схемотехниката. В края на всяка глава има примери на „годни” и „негодни” схемни решения. Чудесно допълнение към книгата е ръководството за лабораторни упражнения *Student manual for the Art of electronics*, написано от Том Хеъс [22]. В него има оригинални мисли, някои от които са разработени независимо и от автора на настоящата работа.

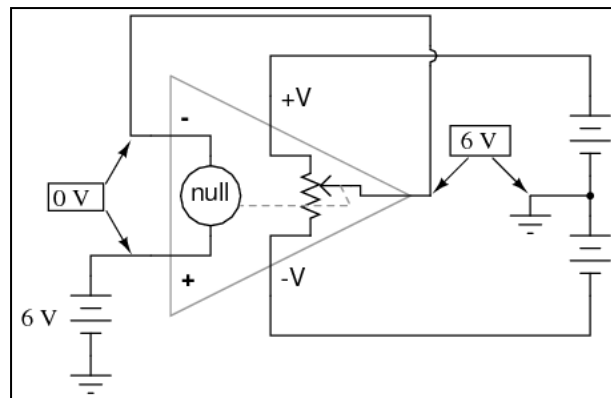


А. Шишков. Интуитивният подход е използван и от известният български популяризатор на електрониката Атанас Шишков при разкриване тайните на аналоговата схемотехника [23]. Стилът му на изложение е изключително ясен, лаконичен и силен; затова книгите му са многократно издавани и използвани широко в техническото образование. Шишков илюстрира богато книгите си като има и някои оригинални начини за представяне на електрическите величини: например, променливите съставки на



токовете представя с вълнообразни линии, действието на инвертираща и неинвертиращ усилвател илюстрира с „лостови“ аналогии и др.

Тони Купхалдт е съвременен уеб автор, който използва интуитивни обяснения на електрическите и електронни схеми в неговите *Лекции по схемотехника* [24] и *Socratic electronics* [25]. Например, за да обясни действието на операционния усилвател, той го представя като една електромеханична сервосистема, която се стреми към състояние на равновесие.



*Интуитивният ум е свещена дарба, а рационалният ум е верен слуга.
Ние създадохме общество, което почита слугата, но е забравило дарбата.*

А. Айнщайн

2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕВРИСТИЧНА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ФУНКЦИОНАЛНО ОПЕРИРАНЕ С БАЗОВИ ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

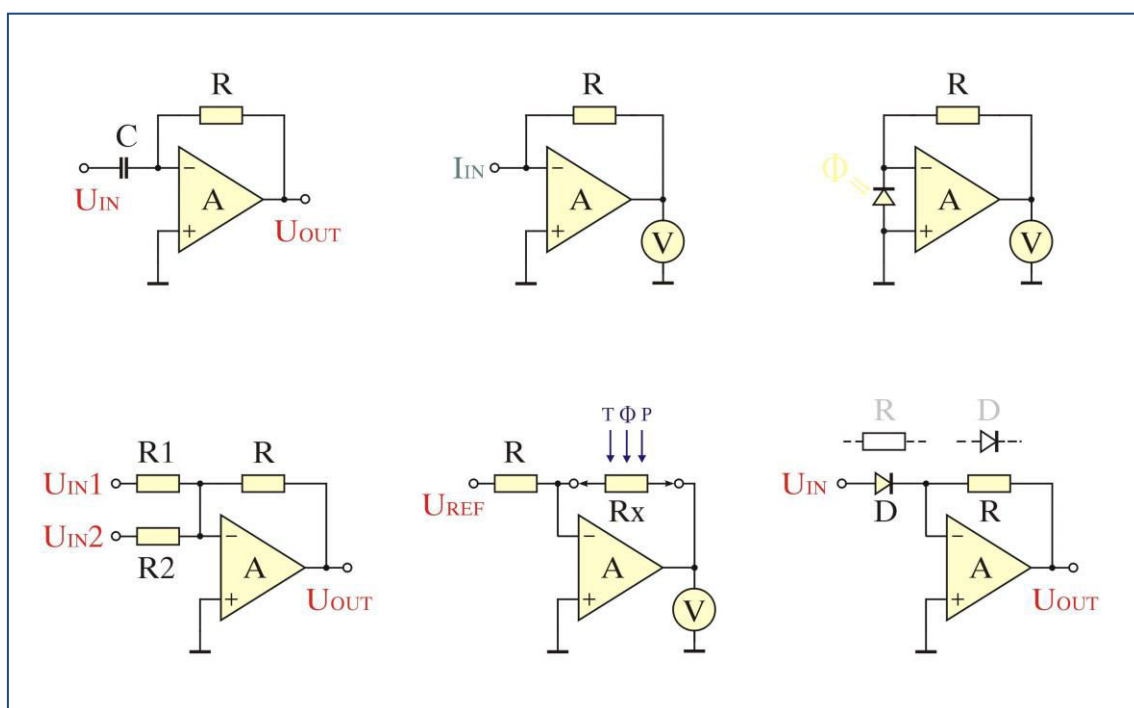
2.1. ФУНКЦИОНАЛЕН АНАЛИЗ (РАЗБИРАНЕ) НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

За да бъдат разбрани схемите, първо трябва да бъдат разкрити базовите идеи, върху които те са изградени.

2.1.1. ЗАЩО ИДЕИТЕ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ СА СКРИТИ

Интерес представлява да се отговори първо на въпроса защо базовите, фундаментални идеи, на които са основани най-популярните електронни схеми, на практика остават неразкрити и се налага да бъдат преоткривани. Причините за това са най-различни, но могат да бъдат сведени до следните:

- Обикновено не се смята за необходимо да се разкриват фундаменталните идеи и електронните схеми се представят в един компактен, съвършен, краен и завършен вид. Обаче идеята на схемата е скрита по-скоро в нейната еволюция, отколкото в крайния резултат, в движението от простата, несъвършена схема, към крайната цел.



Фиг. 2.1. „Рецептурни” схеми на базови електронни устройства.

- Преподавателите, притиснати от ограниченото време и големият обем на учебния материал, нямат достатъчно време да разгледат схемите в тяхното развитие и са принудени да ги представят в крайния им завършен вид. Така в лекционните зали се представят готови схемни решения, а в учебните лаборатории се правят констатиращи лабораторни експерименти.
- След многократно повтаряне в литературните източници, основната идея може да се деформира или даже да се загуби (подобно на детската игра на “телефонче”).
- Не винаги изобретателите на електронни схеми могат да ги обяснят по най-добрия начин (така както не винаги авторите на художествени произведения могат да ги изпълнят най-добре). След като стигнат до крайната цел те често загубват желание да възпроизведат пътя, по който са вървели и предпочитат да представят схемите в техния завършен вид.
- Не винаги тези, които представят схемните решения, са заинтересовани да ги разкрият напълно. Патентните описания са пример за нежеланието на изобретателите да бъдат разкрити схемните им идеи. Друг пример са фирмите-производители, които в своите материали обикновено третират читателите си не като създатели, а като потребители на стандартни схемни решения, основани на техните продукти.
- В много случаи, за разбирането на схемите е по-полезно читателят да си представи, че те са изобретени по начин, различен от действителния (логиката на разбирането може да се различава значително от логиката на изобретяването).
- И накрая, за да се разбере действието на една схема, тя трябва да се пречупи през собствения начин на мислене, да се свърже с досегашния жизнен опит на читателя.

2.1.2. ТЕХНОЛОГИЯ НА РАЗБИРАНЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Какво всъщност се има предвид под “разбиране”? Каква е разликата между “анализиране” и “разбиране”? Анализът се състои в прилагането предимно на формални методи, а разбирането – на евристични. Така, че *разбирането на електронните схеми се състои в тяхното анализиране чрез евристични средства*. Да се разбере една схема означава да се разпознае базовата идея, върху която е изградена тя, а тази фундаментална идея се представя чрез структурна схема и алгоритъм на действие. Базовите идеи не са задължително електрически и са независими от техните конкретни схемни реализации. Елементната база (лампи, транзистори, операционни усилватели) се сменя непрекъснато, но фундаменталните идеи остават; те са безсмъртни... те са вечни!

В процеса на разбиране на непознатата електронна схема могат да бъдат обособени пет етапа: *анализиране на структурата на схемата, анализиране на действието на схемата, разпознаване на известни базови схемотехнически принципи, търсене на сходна идея в други*

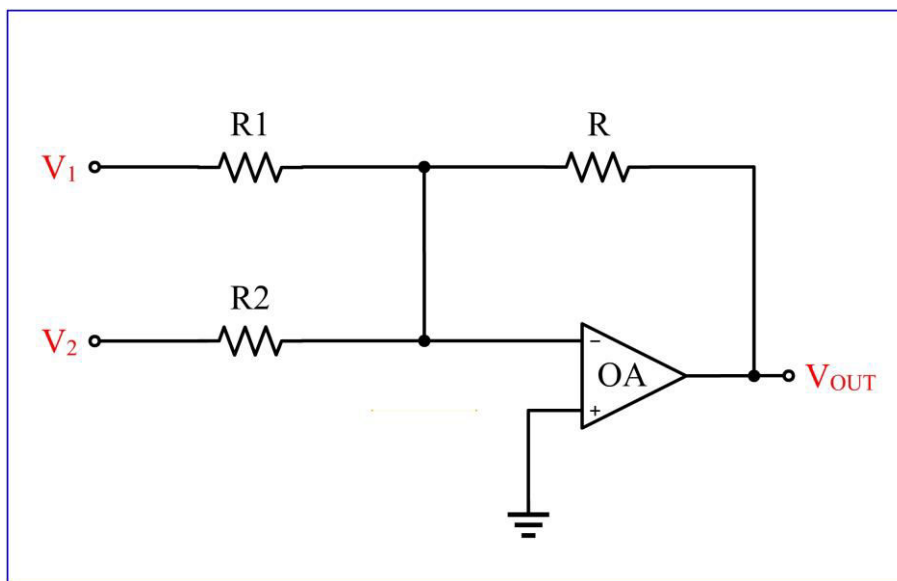
схеми или житейски ситуации, *обобщаване на получените резултати в нов схемотехнически принцип*. В настоящата работа те са отделени с методологическа цел, но в повечето случаи от практиката се изпълняват едновременно.

Технологията на разбирането е илюстрирана по-долу с две примерни схеми, като за разнообразие първата е *аналогова* (активен суматор на напрежения, реализиран с операционен усилвател), а втората - *цифрова* (емитерно свързана логическа схема ECL). Схемите са разглеждани паралелно, като са обработени последователно в няколко стъпки, съгласно предложената технология (описани са с по-дребен шрифт и по-малко междуредие).

***Eman I:* АНАЛИЗИРАНЕ НА СТРУКТУРАТА НА СХЕМАТА**

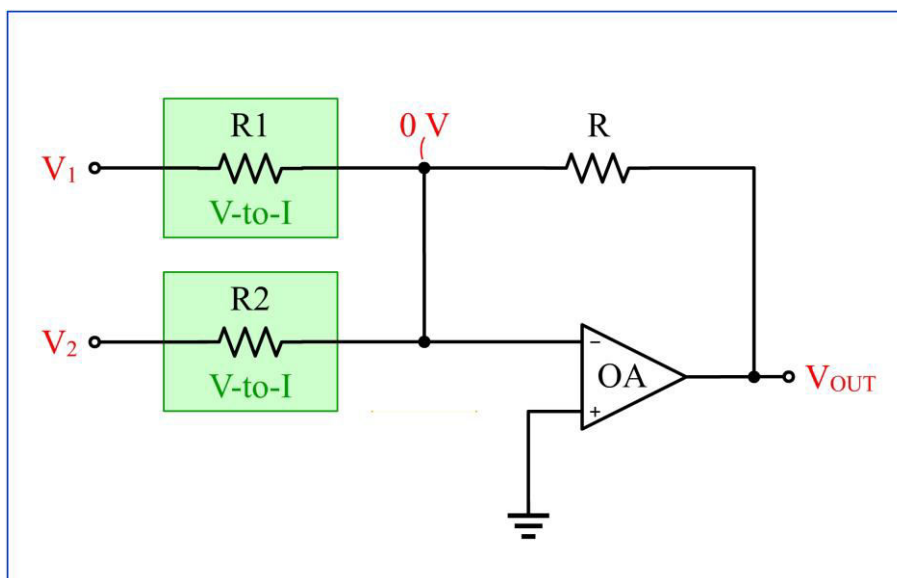
Разбирането на една електронна схема започва с анализ на нейната структура. Образно казано, това се състои в *откриване на познати неща в непознатата схема*. За целта се разглежда добре схемата, като се прави опит да се разпознаят в нея известни вече по-елементарни устройства. Маркират се (ограждат се с контур) и се надписват функционалните групи от под-устройства и елементи, формиращи разпознатите известни устройства. Този процес на декомпозиция продължава чрез разграждане на схемата на още по-елементарни градивни блокчета (в конкретните примери по-долу, наименованията на градивните блокчета са изписани в курсив).

Инвертиращ суматор. Популярната аналогова схема на инвертиращ двуходов суматор се представя традиционно като съставена от четири елемента - резистор R1, резистор R2, резистор R и операционен усилвател OA (фиг. 2.2а), след което се анализира формално. Представена така обаче, в нея не се виждат функциите на отделните елементи ("виждат се дърветата, но не се вижда гората").

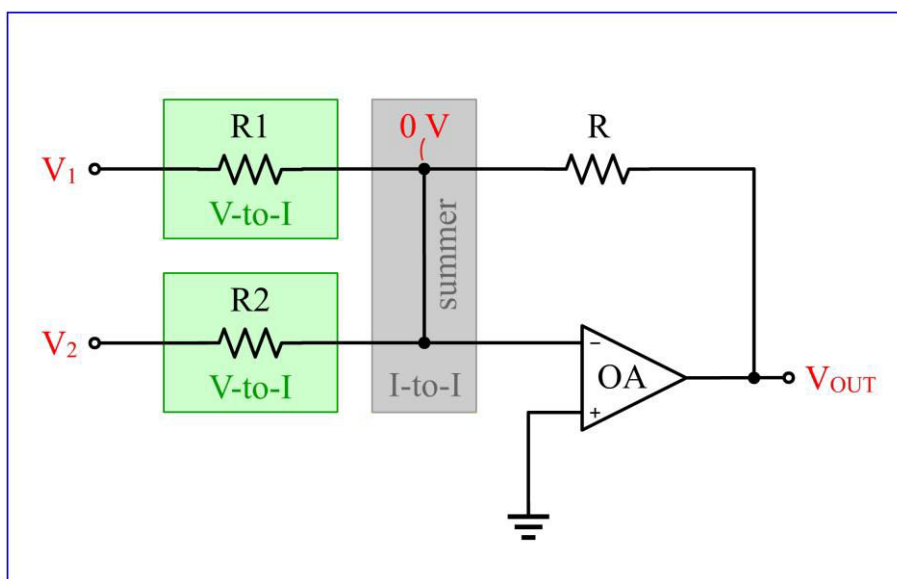


Фиг. 2.2а. Традиционно схемата на инвертиращия суматор се представя като съвкупност от резистори (R1, R2 и R) и операционен усилвател OA.

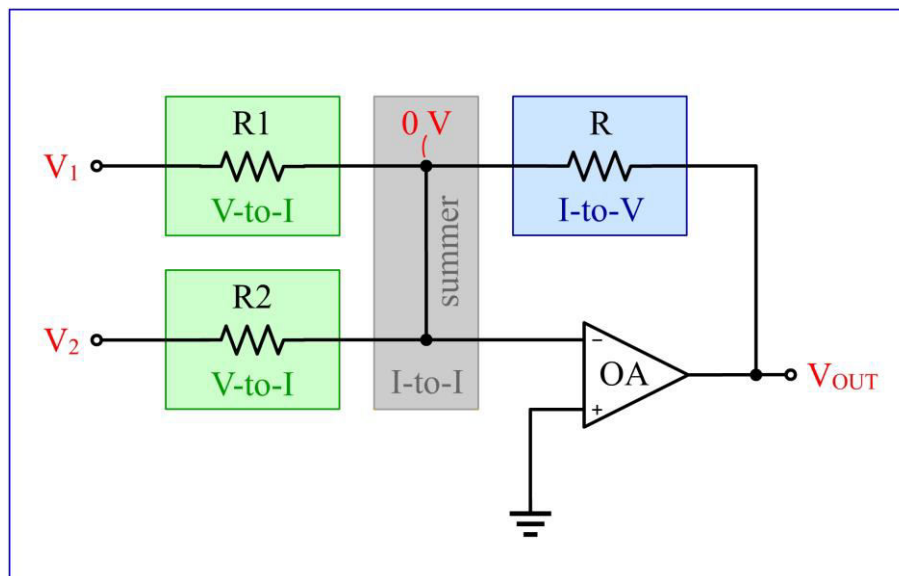
Ако обаче разгледаме внимателно схемата, лесно ще разпознаем елементарните преобразуватели *напрежение-ток* в резисторите R1 и R2 (фиг. 2.2б), *токовия суматор* във възела на инвертиращия вход (фиг. 2.2в) и преобразувателя *ток-напрежение* в резистора R (фиг. 2.2г). След това, ако обединим тези елементи в едно цяло, ще разпознаем в него схемата на един *пасивен паралелен суматор на напрежения* (фиг. 2.2д). Накрая остава само да изясним ролята на операционния усилвател ОА (фиг. 2.2е), но това ще направим най-добре, след като разгледаме действието на схемата.



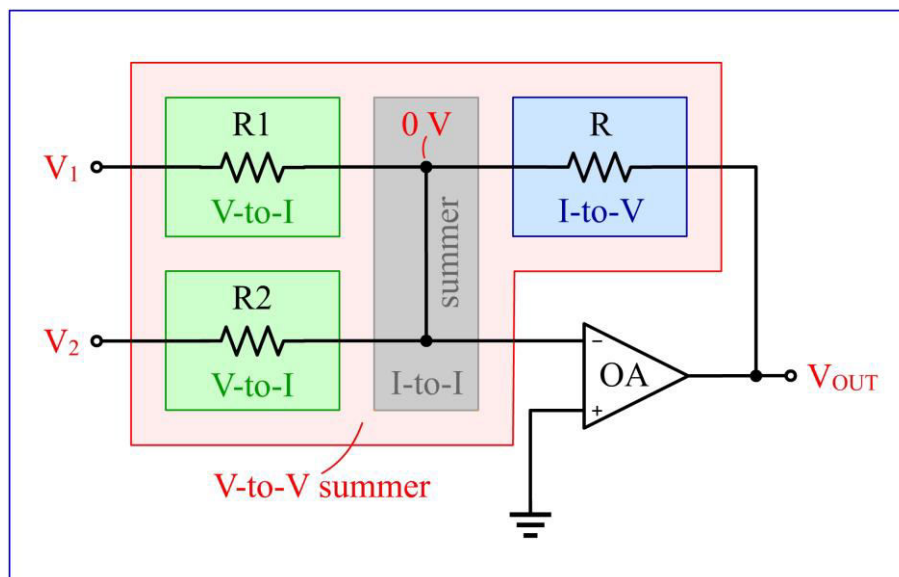
Фиг. 2.2б. В схемата на инвертиращия суматор, операционният усилвател ОА поддържа почти нулево напрежение на входа си поради големия коефициент на усиление и наличието на отрицателна обратна връзка. Поради това, резисторите R1 и R2 са „виртуално замасени“ отъясно и преобразуват входните напрежения в токове, съгласно закона на Ом, записан в неговата обичайна форма ($I = V/R$).



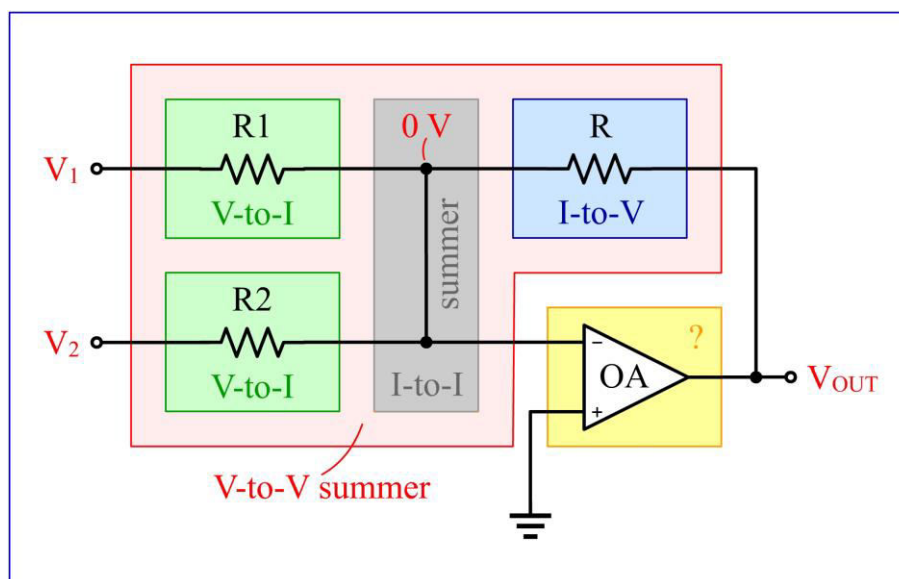
Фиг. 2.2в. Токовете, протичащи през резисторите R1 и R2, се сумират в общата точка (възела), свързан към инвертиращия вход на операционния усилвател, съгласно първия закон на Кирхоф. Така възелът изпълнява функциите на един елементарен *токов суматор*.



Фиг. 2.2г. Сумарният ток, получен от изхода на токовия суматор, протича през резистора R и се преобразува в напрежение, отново съгласно закона на Ом, но записан в неговата „обратна“ форма ($V = I.R$). Така резисторът R изпълнява функцията на обратния преобразувател ток-напрежение.

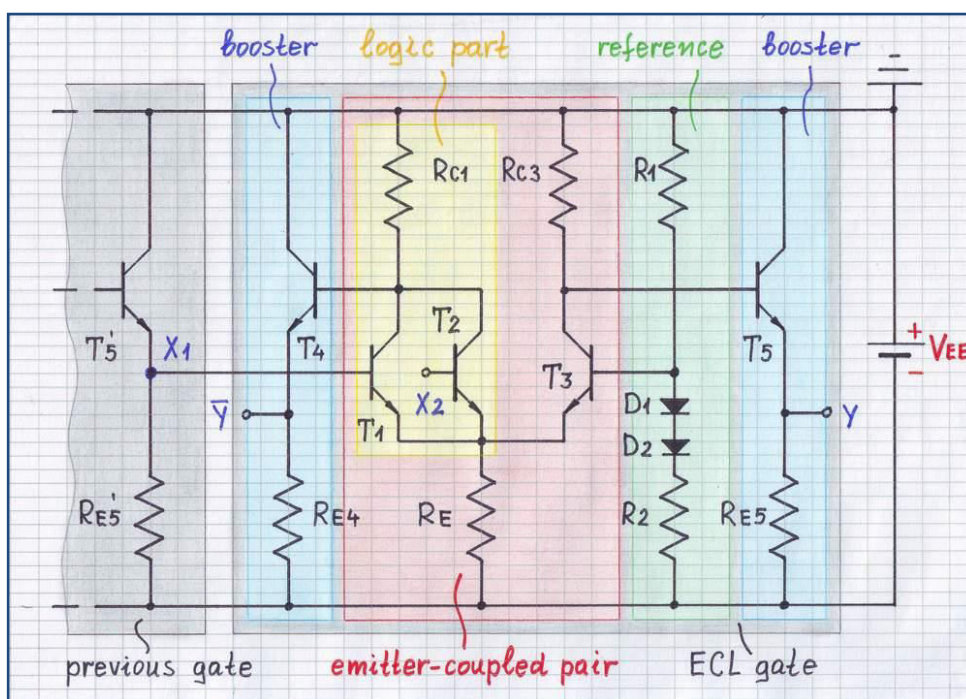


Фиг. 2.2д. Съвкупността от преобразувателите напрежение-ток (R_1 , R_2), токовия суматор (възела) и преобразувателя ток-напрежение (R), формира един пасивен суматор напрежение-напрежение.



Фиг. 2.2е. Накрая остава само да се изясни функцията на активния елемент - операционният усилвател ОА. Това може да бъде направено най-добре, след като се изследва действието на схемата.

Емитерно-свързана логическа схема (ЕСЛ). В тази схема (фиг. 2.3) първо забелязваме в централната част една *емитерно-свързана двойка транзистори* (Т1, Т2 отляво и Т3 отдясно), известна още като *диференциален усилвател с несиметричен вход* или *емитерно-свързан усилвател*.



Фиг. 2.3. Принципна схема на ECL елемент с очертани блокчета.

В съвкупността от елементите R1 и R2 пък разпознаваме простия *делител на напрежение*. След това забелязваме, че транзисторите T4 и T5 са *емитерни повторители*, действащи като изходни буфери.

2.1. ФУНКЦИОНАЛЕН АНАЛИЗ (РАЗБИРАНЕ) НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

Тази процедура продължаваме, като разграждаме схемата на още по-елементарни градивни блокчета. Например, в състава на диференциалния усилвател виждаме по-простата *логическа схема ИЛИ-НЕ с директна връзка* (съвкупността от елементи T1, T2 и Rc1). Също така забелязваме, че елементите T1, Rc1 и Re в лявата страна на диференциалния усилвател и елементите T3, Rc3 и Re в дясната му страна изграждат две *усилвателни стъпала от типа „общ емитер“ с последователна отрицателна обратна връзка*, действащи като преобразуватели *напрежение-напрежение*. Тях пък можем да разградим на по-елементарните активни транзисторни преобразуватели *напрежение-ток* (T1, Re отляво и T3, Re отдясно) и обратните още по-елементарни преобразуватели *ток-напрежение* Rc1 и Rc3. От друга страна, ако обединим десния емитерен повторител (T3) с *делителя на напрежение* (R1 и R2), получаваме *транзисторен източник на неизменно напрежение с последователна отрицателна обратна връзка по напрежение*. Накрая можем да обединим десния преобразувател *напрежение-ток* (T3 и Re) с *делителя на напрежение* (R1 и R2) и получаваме *транзисторен източник на неизменен ток с последователна отрицателна обратна връзка по ток*, който захранва с константен ток пасивния преобразувател *ток-напрежение* Rc3.

Ако се използват следните съкращения за градивните блокчета: ЕСЛ – емитерно свързана логическа схема; ДУНВ – диференциален усилвател с несиметричен вход; ИН – източник на напрежение и ЕП – емитерен повторител, структурата на схемата може да се представи като съвкупност от три елемента:

$$\text{ЕСЛ} = \text{ДУНВ} + \text{ИН} + 2\text{ЕП}$$

Етап II: АНАЛИЗИРАНЕ НА ДЕЙСТВИЕТО НА СХЕМАТА

След анализа на структурата, осъзнаването на непознатата схема продължава с изследване на действието ѝ. Сега се правят опити да се открият фундаменталните принципи, заложи в нея.

За изследване на схемата може да се използват *мислени, симулационни и реални експерименти*. На етапа на разбирането най-често се използват мислените експерименти, защото човешкият мозък е една чудесна изследователска лаборатория, в която може да се провеждат виртуозни експерименти. Върху мисления екран на човешкото въображение може да се „прожектира” действието на електронните схеми и да се експериментира с тях.

Мислените експерименти на този етап може да се подпомогнат и проверят с помощта на симулационни програми и реални експерименти в лабораторията, осъществени с компютризирани измервателни средства.

1. Подготвяне на схемата за анализ на действието

Начертана в стандартния си компактен вид, анализираната схема е удобна за запомняне, но не и за разбиране. Затова тя трябва да се обогати с допълнителни елементи, които помагат да се осъзнае по-добре. За целта:

- Към входовете се включват източници на напрежение или ток, в зависимост от естеството на схемата. Вместо променливотокови източници с неясна в даден момент полярност е по-добре да се използват постояннотокови източници с конкретна стойност и полярност (за

предпочитане е в началото тя да бъде положителна). Така се прави една моментна “снимка” на състоянието на електрическите величини в схемата.

- В изхода се включва товар, за предпочитане с омично съпротивление.
- Свързват се захранващите източници към схемата.
- Приема се, че елементите, от които е съставена изследваната схема, са идеални: операционните усилватели имат безкрайно голямо усилване, нищожни входни токове и напрежение на несиметрия, пренебрежимо малко изходно съпротивление; транзисторите нямат базов ток (когато това е допустимо) и прагово напрежение U_{BE0} , характеристиката им е линейна; съпротивлението на резисторите не зависи от температурата; кондензаторите нямат утечка; двойните елементи са напълно симетрични (нямат разлика в параметрите) и т.н. Накратко, забравя се за несъвършенствата на елементите и всичките тези проблеми се оставят за следващия количествен анализ.

- В някои случаи обаче, идеите използват именно несъвършенствата на електронните елементи (това всъщност е популярният изобретателски принцип *обръщане на вредата в полза*). Примери: влиянието на температурата върху съпротивлението на резисторите; напрежението U_{BE} на транзисторите; използване на “вредното” напрежение U_F на p-n прехода като опорно напрежение, на базовия ток I_B на транзистора като компенсиращ входния ток на операционен усилвател и т.н. В тези случаи умишлено се засилват несъвършенствата на електронните елементи и вниманието се фокусира върху тях.

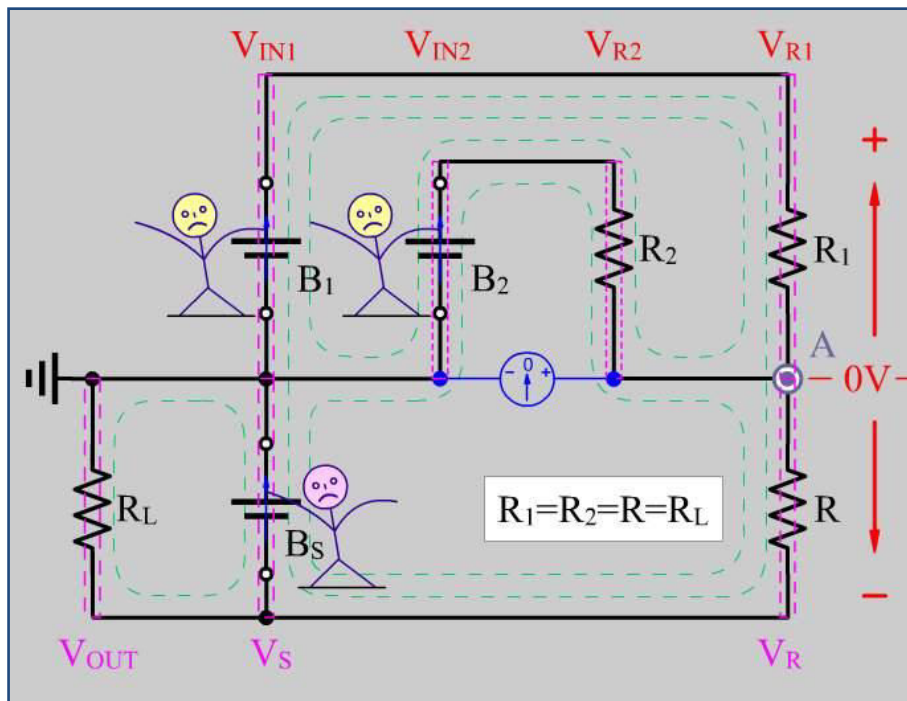
- Преди да се пристъпи към мислените експерименти, изследваната схема се подготвя за следващото нанасяне на визуализираните електрически величини. С тази цел, тя се начертава в един пространствен (“геометричен”) вид: положителните източници се разполагат над, а отрицателните - под “нулевата” линия; “разтягат” се резисторите, върху които ще се нанасят потенциални диаграми; избира се подходяща топология на схемата така, че токовете контури да не се пресичат много и т.н. [26].

- Визуализират се невидимите електрически величини, като върху схемата се наслагват картините на напреженията и токовете:

- напреженията се представят чрез стълбчета в червен цвят (асоциация с налягане, енергия), височината на които е пропорционална на напреженията (падовете) върху съответните елементи.
- токовете се представят чрез затворени контури в зелен или син цвят (асоциация с воден поток), чиято дебелина е пропорционална на силата на токовете в съответните участъци.

Инвертиращ суматор. В схемата на инвертиращия суматор на напрежения, входните електродвижещи напрежения и падовете върху резисторите R1 и R2 са положителни, затова начертаваме тези елементи

над “нулевата линия” (фиг. 2.4). Падът върху резистора R и компенсиращото го електродвижещо напрежение V_S са отрицателни – следователно, начертаваме ги под “нулевата линия”. Входните вериги (V_1-R_1 и V_2-R_2), изходната верига (V_S-R) и товарната верига (V_S-R_L) пък начертаваме така, че да може по-късно да наложим върху тях непресичащи се токови контури (това се отнася за топологията на цялата схема).



Фиг. 2.4. „Геометрично” начертана схема на инвертиращ суматор.

ЕСЛ. Понеже всички напрежения и падове в ЕСЛ схемата са отрицателни, начертаваме напрежителните стълбчета, които ги представят, под “нулевата линия” на масата (фиг. 2.5). Във всеки един клон на схемата, сумата от дължините на стълбчетата е равна на най-голямото стълбче, представлящо захранващото напрежение $V_{EE} = -5,2 \text{ V}$.

2. Изследване на схемата

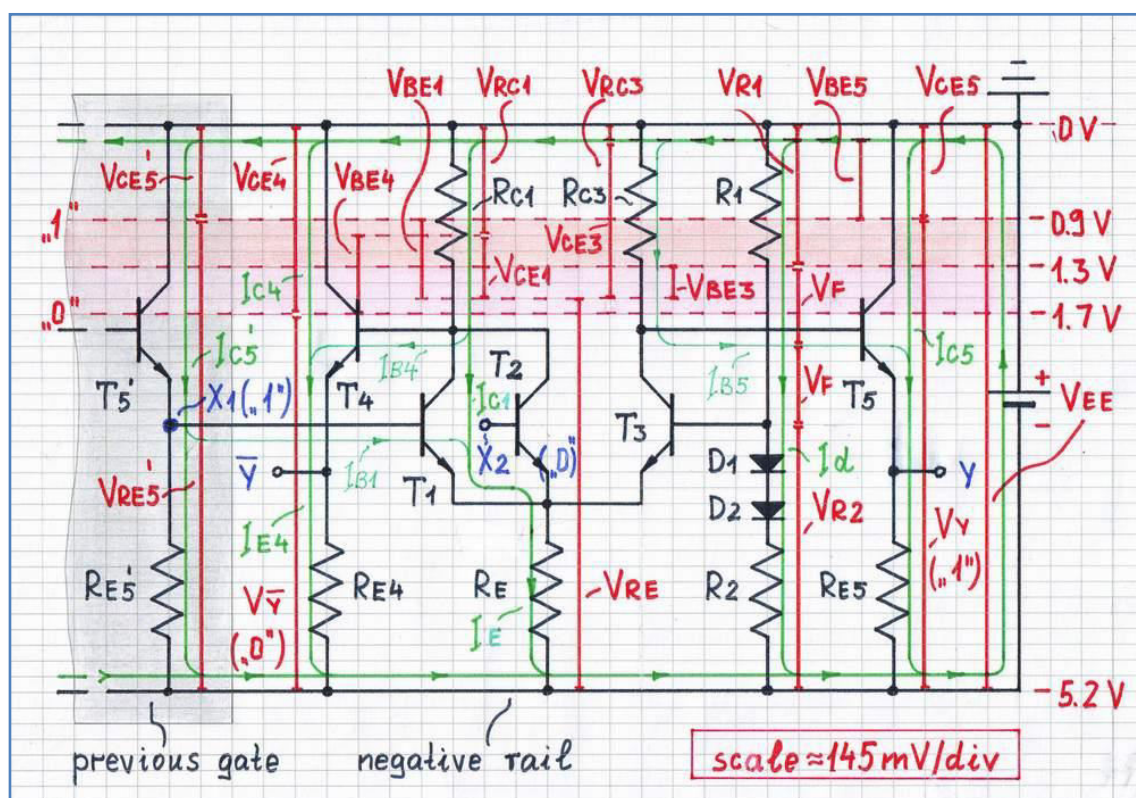
Изследва се действието на схемата като „експериментаторът” подава мислено входни сигнали и си представя каква е нейната реакция. За да се добие качествена представа за аналоговите схеми, в повечето случаи са напълно достатъчни три нива на входните сигнали (нулево, положително и отрицателно), а за цифровите – две нива, отговарящи на логическа „0” и логическа „1”. Схемата се изследва в следната последователност.

Стъпка 1. Приема се, че в първия момент входните сигнали на изследваната схема са равни на нула. Прави се опит да се добие представа какви са потенциалите в отделните точки, напреженията върху елементите и токовете в отделните клонове на схемата при това начално състояние. Нанася се картината на потенциалите и токовете.

Инвертиращ суматор. В тази схема при нулеви входни напрежения V_{IN1} и V_{IN2} всички потенциали,

По време на този преход, два източника на напрежение (T1 и T3) са свързани паралелно и захранени от един общ източник на ток (R_E захранен чрез V_{EE}). Те са в конфликт, защото T3 прави всичко възможно да поддържа неизменно общото емитерно напрежение, докато T1 се опитва да го повиши. Тези две системи с отрицателна обратна връзка реагират на всяка интервенция в техните изходи: ако T1 започне да се отпуска за да увеличи емитерния си ток и напрежение, в отговор T3 започва да се запушва за да си намали емитерния ток и напрежение. В резултат на това, колекторният ток се пренасочва рязко отдясно наляво при почти постоянно емитерно напрежение (*current steering*).

В края на прехода, когато входното напрежение достигне нивото на логическата „1“, целият колекторен ток на транзистора T3 е отнет от T1 (фиг. 2.9). Това е максималният колекторен ток, който е по-малък от тока на насищането $I_{SAT} = V_{EE}/(R_{C1} + R_E)$. Очевидно, така е предотвратено насищането на транзистора T1, което е главното предимство на ECL схемите.



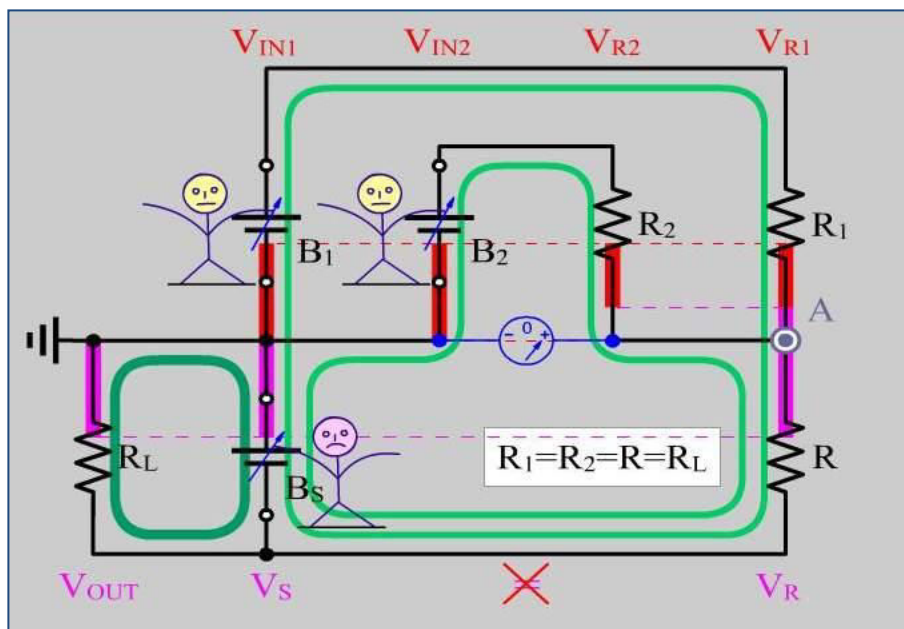
Фиг. 2.9. ECL схема при подадена логическа „1“ на входа

Стъпка 3. Връща се входния сигнал до началното нулево положение и след това се изменя със скок в обратната, отрицателна посока. Изследва се отново реакцията на схемата при това ново въздействие, като изследователят прави опит да си представи как се изменят потенциалите и токовете в отделните точки и клонове на схемата. В името на доброто разбиране, схемата се пречертава така, че да съответства на новата полярност.

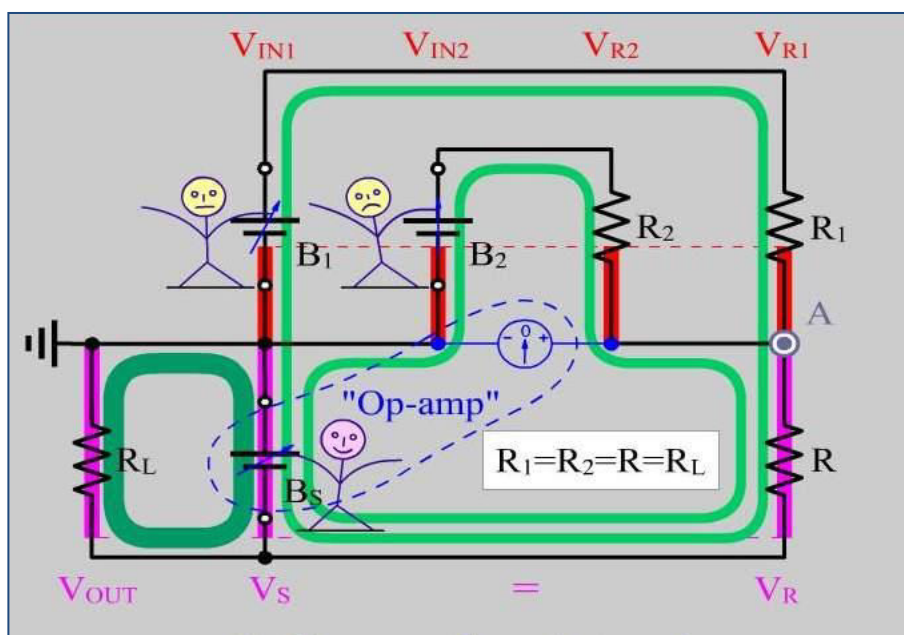
Инвертиращ суматор. В схемата на инвертиращия суматор начертаваме входното електродвижещо напрежение V_I под “нулевата линия”. Падът върху резистора R и компенсиращото го електродвижещо напрежение V_S стават положителни - затова ги чертаем над “нулевата линия”. Накрая обръщаме стрелките на токовете контури, защото токовете си сменят посоката.

Стъпка 4. Нулира се входния сигнал, с който е боравено до този момент и започва експериментиране със следващия входен сигнал.

Инвертиращ суматор. В схемата на инвертиращия суматор изменяме със скок входното напрежение V_2 (фиг. 2.10 и стр. Р6-4 на [анимацията](#) [30]). Сега „операционният усилвател” се принуждава да измени още повече напрежението V_S в отрицателна посока, за да възстанови отново равновесието (фиг. 2.11).



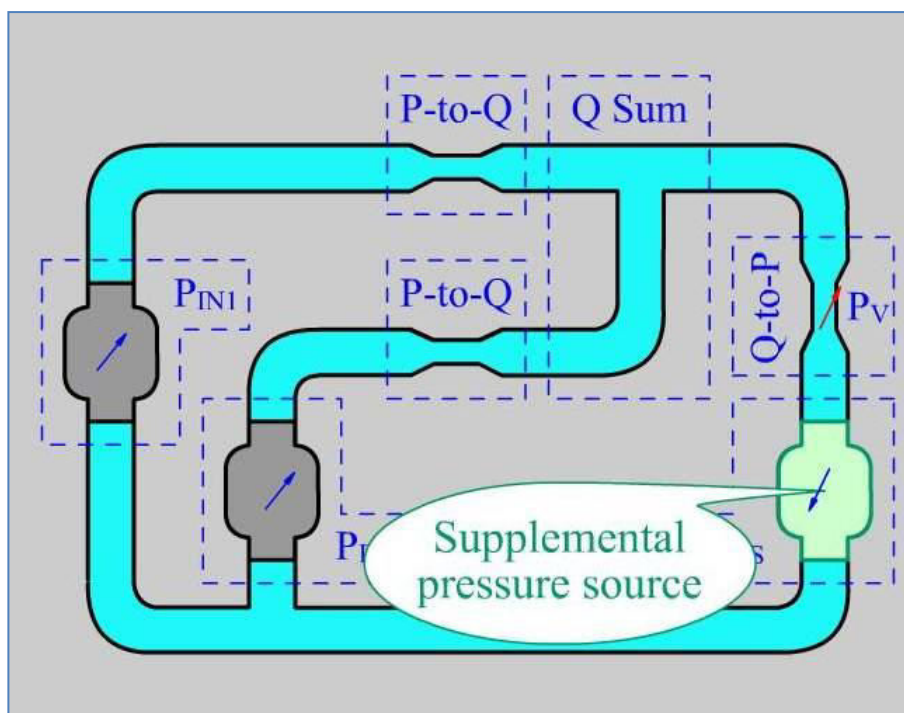
Фиг. 2.10. Напрежението V_2 , подавано на втория вход на инвертиращия суматор, се изменя със скок.



Фиг. 2.11. Като изменя още повече напрежението V_S в отрицателна посока, докато нулевият индикатор I покаже отново нулево напрежение, „операционният усилвател” успява отново да възстанови равновесието.

Стъпка 5. Задълбочава се изследването, като се менят *едновременно* няколко входни сигнала или параметъра на схемата. На практика най-често се ограничаваме до две величини, които се изменят едновременно (синфазно) и противоположно (диференциално).

За да се разшири представата за действието на схемата, може да се използва целия “арсенал” от аналогии (т. 3.3.3). Например, изследователят си представя, че входният източник на напрежение е компресор, който започва да нагнетява въздух в изследваното устройство (пневматическа аналогия) и наблюдава как се променят налягането в отделните точки и дебитът на въздушния поток (фиг. 2.12). Или пък оприличава източника с воден стълб, издигнат над земната повърхност (хидравлическа аналогия), и наблюдава как се спускат водни поточета от по-високите към по-ниските части. В някои случаи върши добра работа и механическата аналогия.



Фиг. 2.12. Флуидна аналогия на активен инвертиращ суматор (напрежение $\leftrightarrow$ налягане, ток $\leftrightarrow$ поток, съпротивление $\leftrightarrow$ стеснение). Допълнителната помпа компенсира загубата на налягане в стеснението така, както операционният усилвател на фиг. 2.17ж компенсира напрежителния пад върху елемента E2.

Етап III. РАЗПОЗНАВАНЕ НА ИЗВЕСТНИ БАЗОВИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИ ПРИНЦИПИ

Разбирането на схемата продължава с опити да се разпознаят в нея елементи, реализиращи някои от известните базови схемотехнически принципи (т. 3.1). За целта се маркират (например, ограждат се с контур) и се надписват групите от схемни под-устройства и елементи, отговарящи на обобщените елементи от блоковата схема, която представя съответния принцип.

Начертава се блоковата схема и се прави връзката със съответните елементи от конкретната принципна схема на устройството.

Eman IV. ТЪРСЕНЕ НА СХОДНА ИДЕЯ В ДРУГИ СХЕМИ ИЛИ ЖИТЕЙСКИ СИТУАЦИИ

Ако не може да се разпознае базов схемотехнически принцип (от колекцията), започват да се търсят сходни функции в действието (поведението) на други електронни схеми. За целта се обработват достатъчно количество схеми. Всяко намиране на сходство засилва увереността в наличието на общ, универсален принцип.

Ако не може да се открият подобни идеи в електронните схеми, започва да се търси сходство в различни житейски ситуации (анalogии).

Eman V. ОБОБЩАВАНЕ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ В НОВ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИ ПРИНЦИП

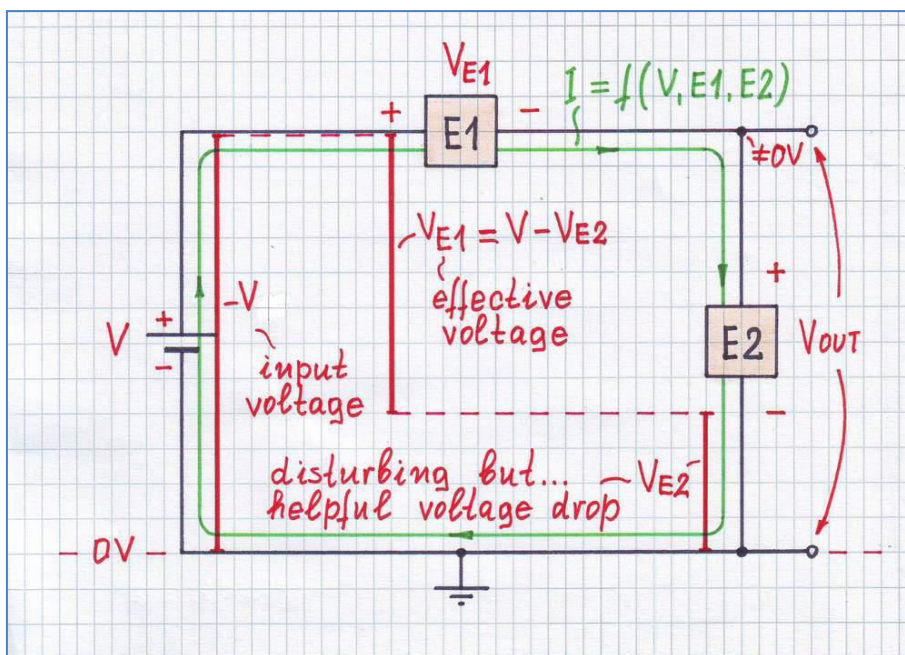
Ако не може да се намери базов схемотехнически принцип никъде, тогава се прави опит да се формулира нов такъв чрез обобщаване на резултатите от изследването (съществено е не само да се разбере как действа конкретната схема, но и да се разшири набора от средства за разбиране на нови електронни схеми):

1. Прави се опит да се намери общото в действието на изследваното устройство и други, познати вече електронни устройства.
2. Търси се общото в действието на тази съвкупност от електронни устройства и житейски аналогии от заобикалящата действителност.
3. Обобщават се наблюденията в поредния принцип и той се прибавя в колекцията от принципи за изграждане на електронни схеми.
4. Начертава се блоковата схема на устройството, което реализира принципа и се прибавя в колекцията от блокови схеми на устройства.

Например, в двете примерни схеми, би могло да се открият или извлекат следните базови схемотехнически принципи:

Инвертиращ суматор. В действието на тази и други подобни на нея инвертиращи схеми (активен преобразувател ток-напрежение – фиг. 3.14, инвертиращ усилвател – фиг. 3.17, интегратор – фиг. 3.18, диференциатор – фиг. 3.19, логаритматор – 3.25, антилогаритматор и др.) наблюдаваме едно и също странно явление: падът на напрежение V_{E2} върху елемента, изпълняващ функциите на преобразувател *ток-напрежение*, е вреден по отношение на входния източник, но в същото време е полезен за товара, защото всъщност това е изходната величина на схемата (фиг. 2.13). Оказва се, че напрежението V_{E2} е необходимо и полезно, а пък е унищожено! Така се наблюдава едно на пръв поглед абсурдно техническо противоречие - **напрежението V_R трябва едновременно да съществува и да не съществува!**

Забелязваме, че този проблем е решен елегантно, като операционният усилвател унищожава “вредното” (по отношение на входните източници) напрежение V_R , подпомагайки входния източник с допълнителното електродвижещо напрежение $V_H = V_R$ (фиг. 2.14).



Фиг. 2.13. В пасивните преобразуватели *напрежение-напрежение* съществува интересно техническо противоречие: падът на напрежение V_{E2} върху изходния елемент E2, изпълняващ функциите на преобразувател *ток-напрежение*, е вреден по отношение на входния източник, но в същото време е полезен за товара, защото всъщност това е изходната величина на схемата.

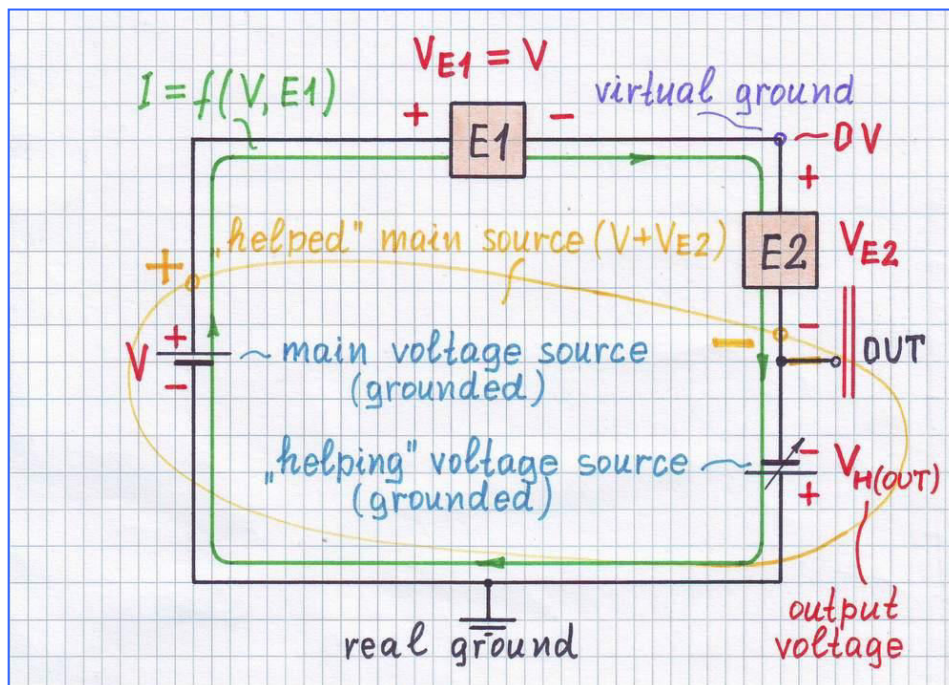
Остава да изясним откъде все пак се взема изходно напрежение за захранване на товара, след като то е вече унищожено. Проблемът е решен елегантно, като товарът е включен към компенсиращия източник V_H , който „копира” напрежението V_R . По този начин, като изход служи не оригиналното изходно напрежение, а неговото „копие”. Така товарът консумира ток I_L не от входния източник, а от подпомагащия източник V_S . В това можем да се убедим, като започнем да меним съпротивлението на товара R_L - изходният ток I_L се мени, но входният ток I_I остава постоянен.

Така можем да формулираме принципа „компенсиране на напрежение чрез анти-напрежение”, разгледан подробно в гл 3.1.1 (модифициране на характеристиките на електронни елементи чрез теоремата на Милър). Чрез него можем да построяваме инвертиращи схеми с отрицателна обратна връзка в пет стъпки:

1. Включваме първи елемент E1, който изпълнява функциите на преобразувател *напрежение-ток*, за да получим изходен ток.
2. Включваме втори елемент E2 с функции на преобразувател *ток-напрежение*, за да преобразуваме тока в изходно напрежение. Но се появява противоречие – напрежението върху втория елемент е полезно за товара, но вредно за входния източник.
3. Решаваме това противоречие, като включваме допълнителен източник със същото напрежение последователно на втория елемент, който унищожава „вредното” напрежение върху него.
4. Използваме напрежението на допълнителния (подпомагащ) източник като изходно

напрежение за схемата. То е отрицателно, но това най-често няма значение или е желано.

5. Заменяме източника с подходящо захранен операционен усилвател и получаваме реалната схема.



Фиг. 2.14 Противоречието е премахнато в активните инвертиращи схеми, в които един операционен усилвател унищожава “вредното” напрежение V_{E2} , като подпомага входния източник с допълнителното напрежение $V_H = V_{E2}$.

ЕСЛ. В действието на емитерно-свързаната логическа схема, при подадени логическа „0” и „1” можем да разпознаем класическия принцип на отрицателната обратна връзка и да забележим, че върху негова основа, с помощта на транзисторите T1 и T2, са реализирани емитерните повторители, източниците на напрежение и ток. След това, в противодействието на двата паралелно свързани източника на напрежение (емитерните повторители T1 и T2) по време на прехода можем да разпознаем принципа на конфликта [39], разгледан подробно в гл 3.1.3.

*Ако не можеш да обясниш едно нещо на шестгодишно дете,
значи ти самият не го разбираш.*

А. Айнщайн

2.2. ФУНКЦИОНАЛНО ПРЕДСТАВЯНЕ (ПРЕПОДАВАНЕ, ОБЯСНЯВАНЕ) НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

След като с помощта на евристичните средства е разбрана как действа една непозната електронна схема, съвсем естествено се поражда желанието тя да бъде обяснена и представено действието ѝ на другите – умение, необходимо не само на преподавателите, но и на всички, които се занимават със схемотехника. Затова в тази глава е обсъдена технологията на представянето (презентирането) на електронните схеми.

2.2.1. КАК ДА СЕ ПРЕДСТАВЯТ СХЕМИТЕ С ПОМОЩТА НА ЕВРИСТИЧНИ СРЕДСТВА?

За да се разбере как действа една готова електронна схема, в която идеята е скрита, в предишната глава се тръгна по обратния път на нейното създаване. Разлагайки я на по-прости устройства и правейки опити да се разпознаят най-общите принципи в нейното действие, всъщност беше възстановена еволюцията на електронното устройство. Сега тази ценна информация ще бъде използвана в правилната последователност за целите на представянето (от началото към края, от несъвършената пасивна електрическа схема към перфектната електронна схема).

Действието на една схема може да се представи най-добре, ако се „изобрети” отново (*преизобрети* или *псевдоизобрети*). Пресъздавайки акта на изобретяването, се формира мисловен инструментариум от схемотехнически трикове и похвати, с помощта на които по-късно може наистина да се изобретяват електронни устройства.

Ако не се разполага с достатъчно време за едно цялостно псевдо-изобретяване, представянето може да се ограничи до едно *построяване* на електронната схема. Етапите на едно такова представяне, осъществено с помощта на евристични средства, са два – *представяне на структурата* и *представяне на действието* на схемата. Те ще бъдат илюстрирани в следващата част на изложението отново чрез примерната схема на един *инвертиращ суматор на напрежения*, като за разнообразие тук тя е тривходова. За целите на доброто представяне, еволюцията на схемата ще бъде разкрита в посока от пасивното към активното схемно решение.

2.2.2. ТЕХНОЛОГИЯ НА ПРЕДСТАВЯНЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Етап 1: ПРЕДСТАВЯНЕ НА СТРУКТУРАТА НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

1. Формулира се задачата, решавана от електронното устройство.

В началото се представя в изчистен вид задачата, решавана от устройството. За конкретната примерна схема на инвертиращ суматор на напрежения тя гласи:

Задача: Да се сумират напреженията от входни източници на напрежение, свързани с общата маса, като резултатното изходно напрежение да се отчита също спрямо масата.

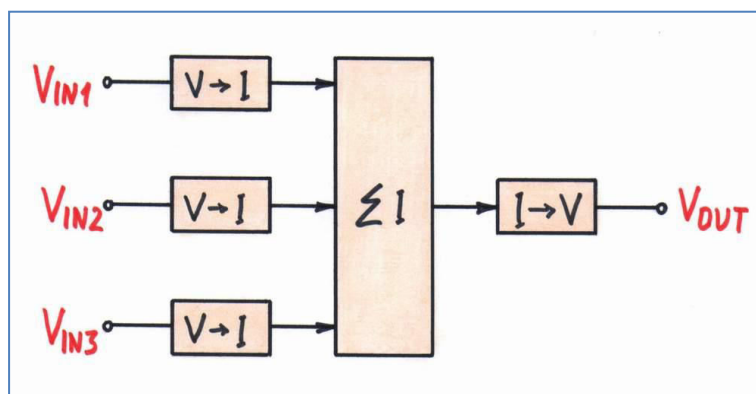
Тази задача е породена от проблема с общата маса на най-елементарната схема на последователен суматор на напрежения, съгласно който не е възможно всички входни източници на напрежение да бъдат свързани с общата маса (разгледан е подробно в гл. 2.3, фиг. 2.20 и 2.21).

2. Представя се базовата идея, върху която е изградено устройството.

След това се формулира фундаменталната идея, върху която се базира действието на електронното устройство. Тя е извлечена в етапа на разбирането (предишната гл. 2.1).

Суматор. По-конкретно, в суматора на напрежения има две фундаментални идеи, които трябва да се разкрият последователно.

Идея 1: Вместо директното последователно сумиране на напрежения (гл. 2.3, фиг. 2.20), решаваме да използваме косвеното паралелно сумиране на напрежения чрез междинното им преобразуване в токове, сумиране на токовете и обратно преобразуване на сумарния ток в напрежение (фиг. 2.15). Образно казано, сумираме напреженията на „твърди“ източници на напрежение, като ги принуждаваме да действат паралелно през „омекотяващи“ съпротивления в една обща изходна точка. Това решава проблема с общата маса, защото в един токов суматор всички входни източници и товарът са свързани с масата.



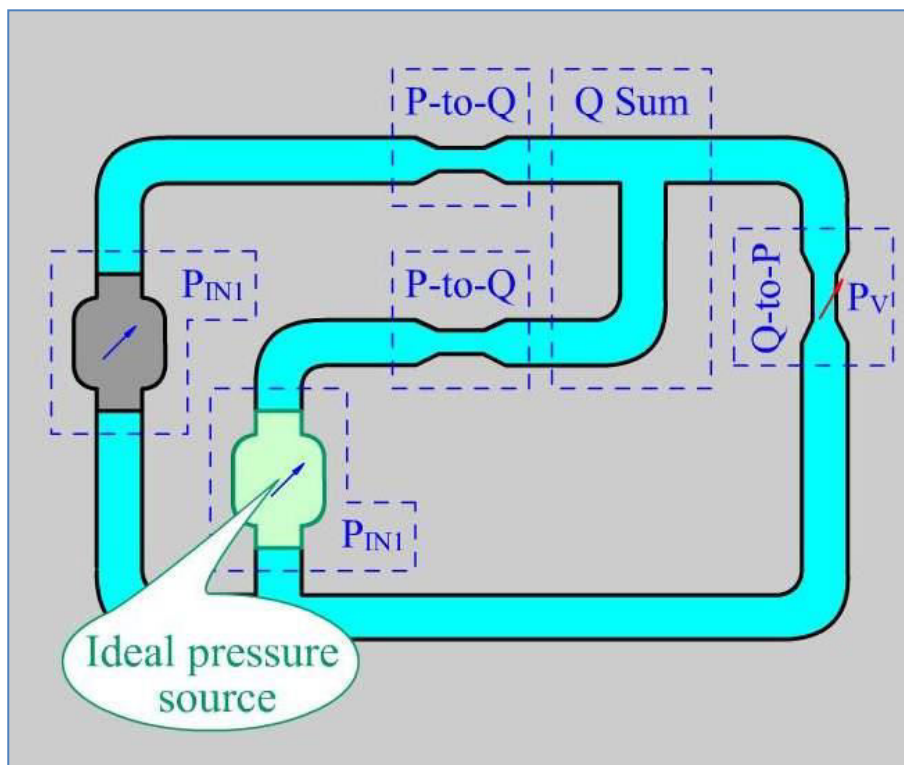
Фиг. 2.15. Проблемът с общата маса може да се реши, като вместо последователно сумиране на напрежения се използва *паралелно сумиране на токове* и допълнително преобразуване на *напрежение в ток* и *ток в напрежение*.

3. Илюстрира се базовата идея чрез аналогии

За да разкрием по-добре базовите идеи в представяното електронно устройство, правим асоциации с множество аналогични житейски ситуации.

Флуидна аналогия. Няколко източника на налягане действат през стеснения (дросели) в една обща точка (например, няколко души надуват един общ въздушен дюшек през въздушните съпротивления на отделни отвори) – фиг. 2.16.

Топлинна аналогия. Няколко топлинни източника загряват едно общо масивно тяло през отделни топлинни „съпротивления” (например, няколко печки топят едно общо помещение през отделни въздушни топлинни „съпротивления”).



Фиг. 2.16. Флуидна аналогия на пасивен резистивен суматор (напрежение $\leftrightarrow$ налягане, ток $\leftrightarrow$ поток, съпротивление $\leftrightarrow$ стеснение)

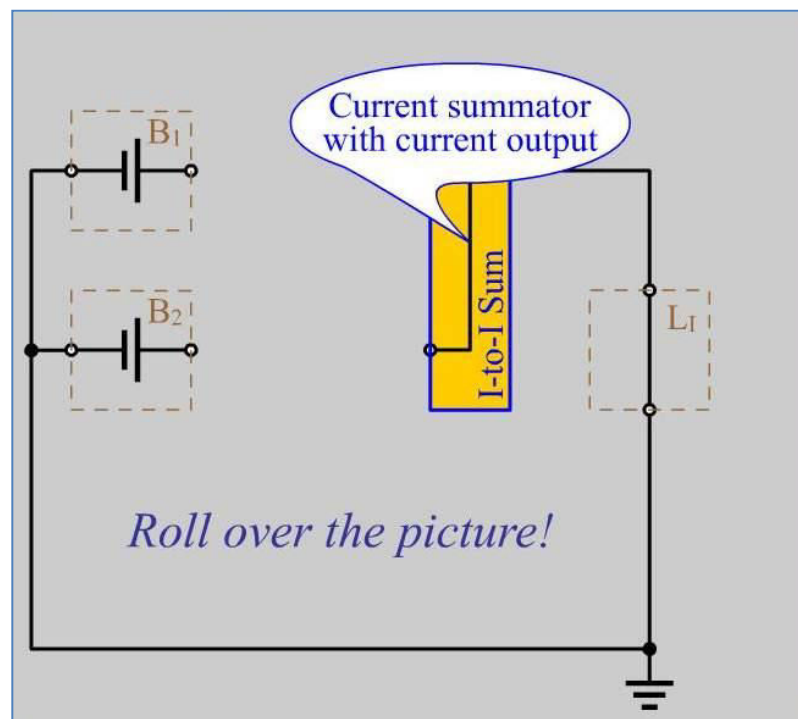
4. Представя се блоковата схема на устройството.

Начертава се блоковата схема на устройството, което реализира идеята, в един най-общ, независим от конкретната реализация вид.

5. Построява се устройството.

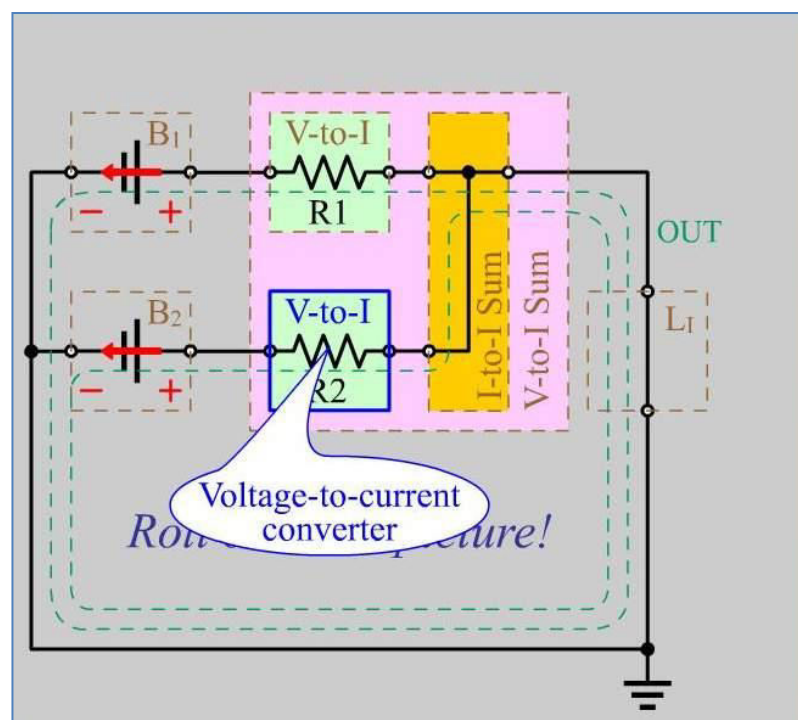
На този етап устройството се изгражда последователно, стъпка по стъпка, като се използват елементарните градивни блокчета от колекцията. Това е показано на следващите фигури 2.17a - 2.17ж, подредени последователно като кадри на филм с пояснителен текст (всъщност това действително са кадри от анимационен Flash филм).

Стъпка 1:



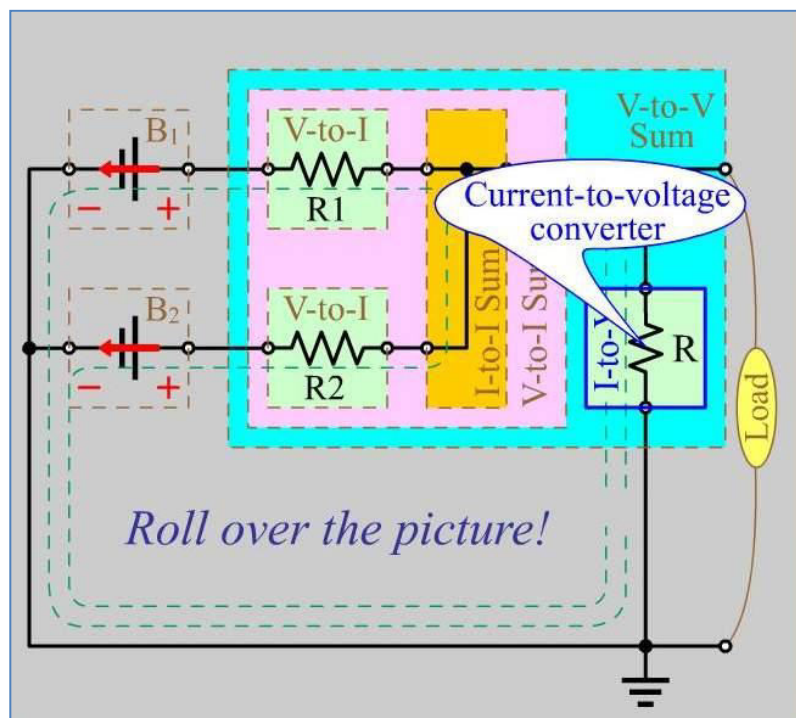
Фиг. 2.17а. Вземаме един токов суматор, с помощта на който можем да сумираме токове от замасени входни източници на ток.

Стъпка 2:



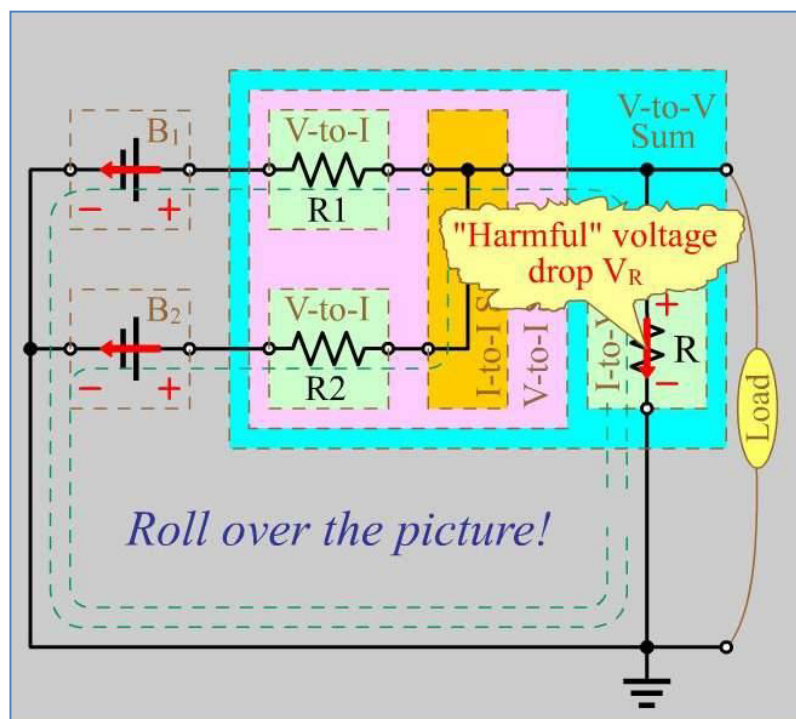
Фиг. 2.17б. Но ние искаме да сумираме напрежения, а не токове... Затова включваме на входовете на суматора преобразуватели *напрежение-ток*.

Стъпка 3:



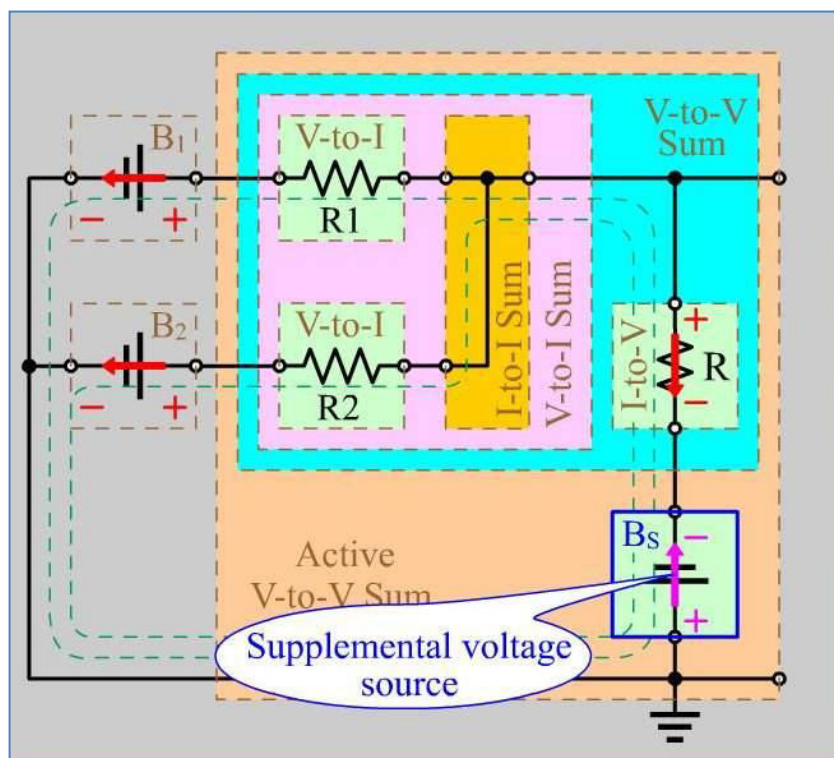
Фиг. 2.17в. Включваме в изхода на суматора обратния преобразувател *ток-напрежение*, защото искаме да получим изходно напрежение, а не ток.

Стъпка 4:



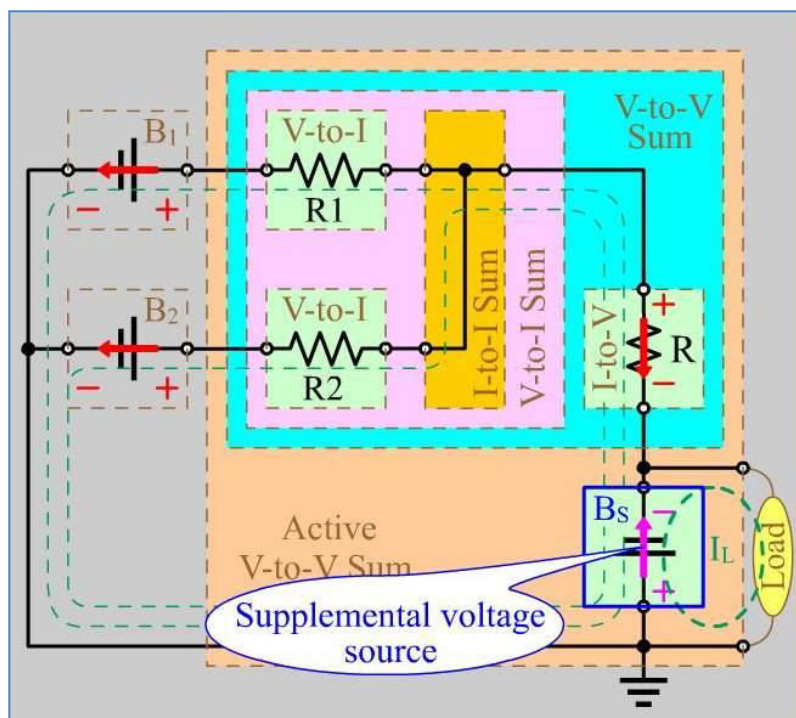
Фиг. 2.17г. Разкриваме техническото противоречие: „вредното” напрежение V_R (съпротивлението R) трябва едновременно да съществува и да не съществува, защото то е полезно за товара, но е вредно за входните източници.

Стъпка 5: Представяме следващата *идея 2* – компенсиране на напрежение чрез „антинапрежение”.



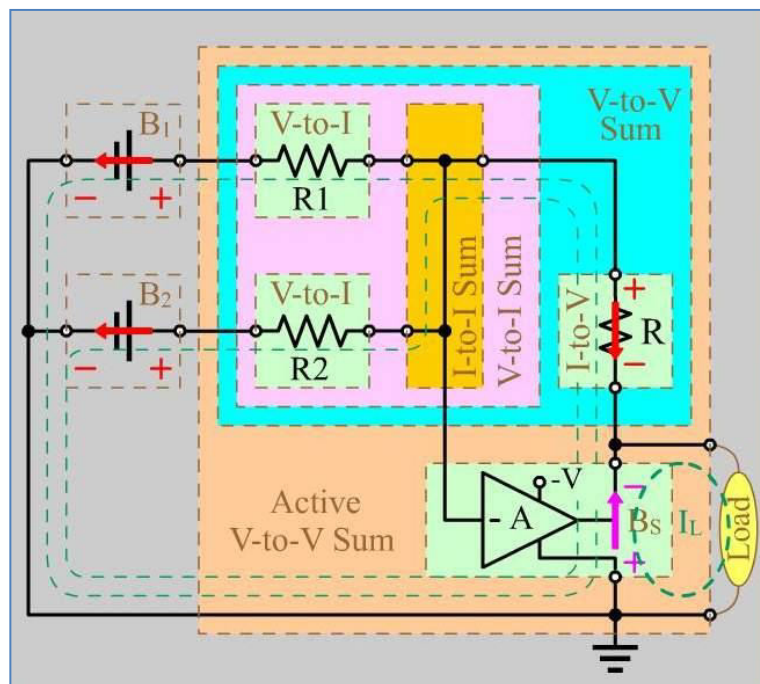
Фиг. 2.17д. Включваме последователно на резистора R допълнителен източник с напрежение $V_S = V_R$, което компенсира „вредата”, нанесена от резистора R .

Стъпка 6: Избираме подходящо място, откъдето да вземем изходен сигнал.



Фиг. 2.17е. Използваме компенсиращото напрежение на допълнителния източник като изходно напрежение (захранваме товара от „копието”, а не от „оригинала”). Така товарът консумира ток от допълнителния, а не от входния източник.

Стъпка 7: Окончателно реализираме схемата с истински електронни елементи.



Фиг. 2.17ж. Един операционен усилвател може да изпълнява функциите на компенсиращ източник. Включваме го и така получаваме окончателната работоспособна схема на *инвертиращ суматор*.

Етап II: ДЕМОНСТРИРАНЕ НА ДЕЙСТВИЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Най-важната част от презентацията е демонстрацията на действието. Тук трябва да се използват всички възможности на човешкото въображение за да се разкрие по най-атрактивен начин дълбоката същност на явленията.

1. Демонстрация чрез въображаеми мислени експерименти.

Това е най-популярният, достъпен и в същото време ефикасен начин, чрез който може да се илюстрира действието на електронните устройства. За това са необходими само две неща:

- от страна на демонстратора – образна реч, която стимулира „прожектирането” на образи в съзнанието на слушателите
- от страна на слушателите – въображение, което да им позволи да си представят образно нещата

2. Демонстрация чрез анимация – представя се „кинематографично” действието на устройството, като се разлага на отделни кадри.

Действието на устройството се представя в два последователни етапа.

Етап 1. Първо се заменят активните елементи в схемата (транзистори и операционни усилватели) с ръчно-управлявани елементи, които изпълняват техния „алгоритъм” на действие (както например на фиг. 2.6). При демонстрацията отделните кадри се прожектират постъпково,

като се съпровождат със словесни обяснения. Това позволява да се покаже ценната информация, скрита в преходния процес.

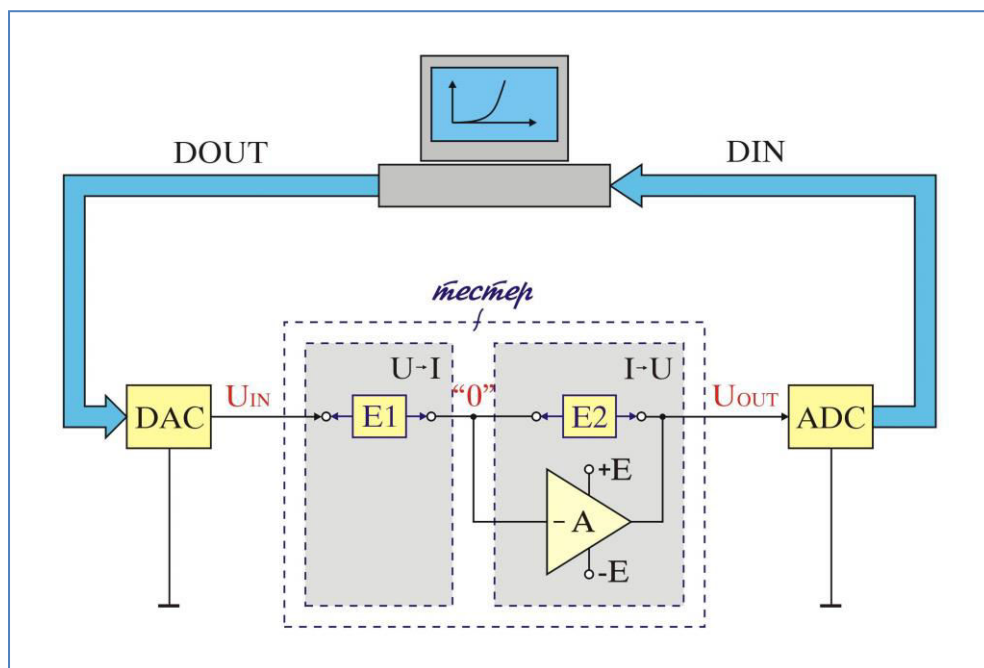
Например, в схемата на инвертиращия суматор, заменяме операционния усилвател с ръчно-управляван източник на напрежение, нулев индикатор и човек-изпълнител. Ролята на последния изпълняваме първо ние, а след това можем да я възложим на някой от присъстващите на демонстрацията.

Етап 2. След това се заменят ръчно-управляваните активни елементи в схемата (транзистори и операционни усилватели) с програмно-управлявани елементи, програмирани с техния „алгоритъм“ на действие. Кадрите се прожектират със забавено темпо в непрекъсната последователност (т.е., прави се анимация).

3. Демонстрация чрез реални експерименти.

Електрическите явления са невидими за нас, хората, защото нямаме сетива, с които да ги усещаме. Затова се нуждаем от преобразуватели на невидимите електрически величини в осезаеми, достъпни за сетивата ни величини.

Традиционните измервателни уреди не са интелигентни – те не „знаят“ що за обекти стоят пред тях и съответно по какъв начин да визуализират получената от тях информация. Така те са принудени да представят електрическите величини в някакъв стандартен, универсален, общоприет вид – линейно преместване на стрелка, двумерна графика върху екран, или цифров код върху дисплей.



Фиг. 2.18. Компютъризирана опитна постановка за демонстрация на устройства.

За целите на представянето обаче ние се нуждаем от друг вид техническо средство, в което да заложим предварително един оригинален, пречупен през призмата на нашето въображение начин на представяне. Така програмиран, този своеобразен „дидактически рентген“ ще визуализира невидимите електрически величини под формата на аналогии, потенциални стълбчета и диаграми, токови контури, волт-амперни характеристики и др. (виж т. 3.2.4). Ролята му може да се изпълнява най-добре от персонален компютър, свързан с подходяща аналогово-цифрова периферия към опитната постановка (фиг. 2.18). Под управлението на подходящо програмно осигуряване, върху екрана може да „оживяват“ всевъзможни интерпретации на явленията, протичащи в изследвания обект. За да бъдем по-убедителни, можем да допълним тази опитна постановка и с традиционни измервателни уреди, които индицират електрическите величини в стандартен вид (както е показано например на фиг. 3.74).

Действието на устройството може да се демонстрира по този начин еволюционно, в три последователни стъпки:

Стъпка 1. Първо се заменят активните елементи в схемата (транзистори и операционни усилватели) с ръчно-управлявани елементи, които изпълняват техния „алгоритъм“ на действие. Сега това са съвсем реални елементи (в нашия пример – въртим регулатора на един лабораторен токоизправител в ролята на „ръчно-управляван“ операционен усилвател), а компютърът пресъздава върху екрана съответната интерпретация.

Стъпка 2. След това възлагаме ролята на активните елементи на персоналния компютър (емулираме ги). За целта откачаме проводника от изхода на „ръчния“ операционен усилвател и го закачаме към управлявания от компютъра цифрово-аналогов преобразувател.

Стъпка 3. Накрая заменяме компютърно-управляваните елементи с истински активни елементи (в нашия пример – с реален операционен усилвател).

2.2.3. Евристични средства, подпомагащи представянето на електронни схеми.

1. Построителен курс по аналогова схемотехника. В този курс електронните схеми не се дават наготово в техния завършен, съвършен и окончателен вид, а се построяват последователно, като всяка следваща схема се изгражда на основата на предишните по-прости схемни градивни блокчета.

2. Библиотека от схемни градивни блокчета по аналогова схемотехника [28]. Съдържа общо 90 схемни градивни блокчета от областта на аналоговата схемотехника.

*Няма нищо по-прекрасно от измислянето на новата идея.
Няма нищо по-великолепно от действащата нова идея.
Няма нищо по-полезно от изпълняващата целта си нова идея.*

Едвард де Боно

2.3. ФУНКЦИОНАЛЕН СИНТЕЗ (ИЗОБРЕТЯВАНЕ) НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

След като с помощта на евристичните средства може да се разбират (гл. 2.1) и представят (гл. 2.2.) съществуващи електронни схеми, съвсем естествено след това се поражда желанието да се създават, синтезират и дори изобретяват нови схеми. Това умение е необходимо не само на конструкторите и изобретателите, но и на преподавателите в областта на схемотехниката. Затова в тази глава е обсъдена технологията на изобретяването на електронните схеми.

2.3.1. ВИДОВЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Псевдоизобретение. Това въображаемо изобретяване беше вече използвано в гл. 2.2 за да се представи ефектно действието на електронните схеми. В резултат на това се натрупа набор от схемотехнически трикове и техники, с помощта на които може наистина да се изобретяват нови електронни устройства.

Субективно ново изобретение. В резултат от разбирането и представянето на електронните схеми най-често се „изобретяват” изобретени вече неща, което обикновено предизвиква насмешката на околните („изобретил колелото”). Наистина, обществото няма пряка полза от тези *субективни изобретения*. Но те са изключително полезни за да се вникне дълбоко в същността на явленията, да се осъзнае смисъла на техническите решения и да се формира изобретателско мислене.

Истинско изобретение. Ако има шанс, може да се достигне до *истинско изобретение* - обективно ново техническо решение – неизвестно до този момент не само на изобретателя, но и въобще. По отношение на творческия процес няма разлика между отделните форми на изобретяване. Различни са само материалните облаги за изобретателя и обществото.

2.3.2. ТЕХНОЛОГИЯ НА ИЗОБРЕТЯВАНЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Етапите на изобретяването ще бъдат разкрити последователно, като за илюстрация ще бъдат използвана примерната схема на добре познатия ни инвертиращ суматор. Историята на това изобретяване не е напълно автентична, а е до голяма степен въображаема. Затова тя не съответства напълно на действителния път, извървян от изобретателя на тази схема. Понеже устройството е отдавна изобретено и съществува, това в известен смисъл е отново едно псевдо-изобретяване, но сега то е много по-близко до истинското изобретяване. За целта временно забравяме, че устройството е вече изобретено и проиграваме отново етапите на неговото

изобретяване. Този подход е оправдан тук, защото идеята на тази глава е по-скоро да се покаже начина, по който мисли изобретателят, пътя по който той се движи, когато му хрумва новата идея, а не толкова самата идея.

Разликата между изобретяването и построяването на схеми е, че при изобретяването няма готово решение на проблема, не е известен крайният резултат, докато при построяването сценарият, който следва презентаторът, е ясен. С други думи, при изобретяването има елемент на неизвестност.

Изобретяването на примерното устройство може да се осъществи с помощта на евристични средства в следните етапи.

Етап I: ИЗОБРЕТЯВАНЕ НА СТРУКТУРАТА НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

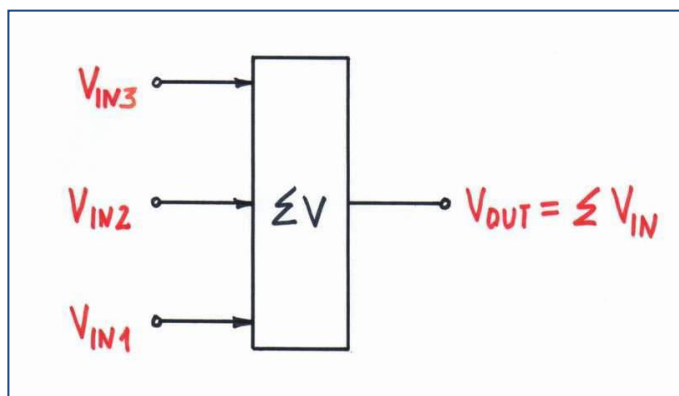
1. Поставя се задачата, която електронното устройство трябва да изпълнява.

Възможни са два начина за поставяне на задачата:

- Първият е да чакаме пасивно задачата да ни бъде „спусната отгоре”. Тук се крие първата опасност, защото задачата може да не е формулирана правилно.
- Вторият начин е сами да си поставим задачата – например, недоволни сме от някаква схема и искаме да я усъвършенстваме.

За целите на настоящата работа приемаме, че ни е възложена първата задача:

Да се създаде устройство за сумиране на напрежения (суматор) – фиг. 2.19.

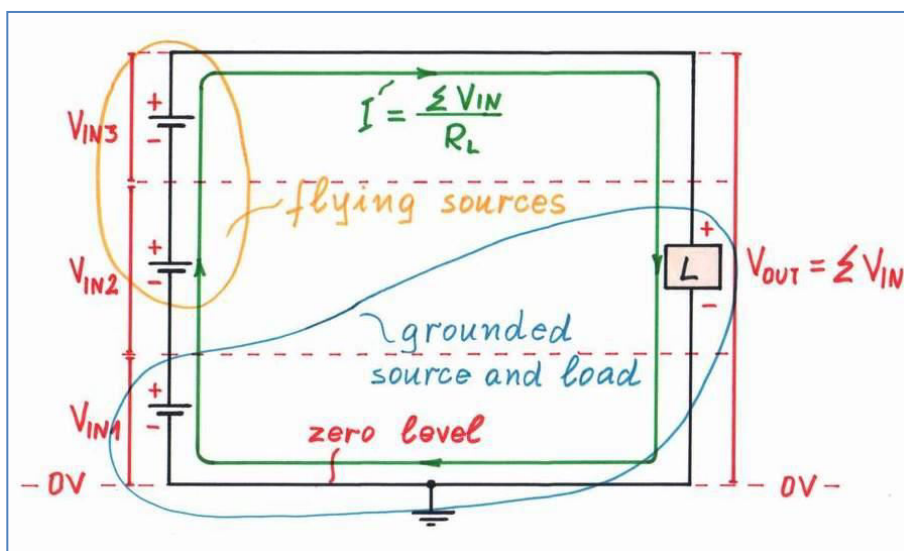


Фиг. 2.19. Задачата: да се създаде суматор на напрежения

2. Започва се решаването на задачата.

Започваме с очевидното решение – първото, което би ни хрумнало за да се справим с поставената задача и което можем да открием в литературата.

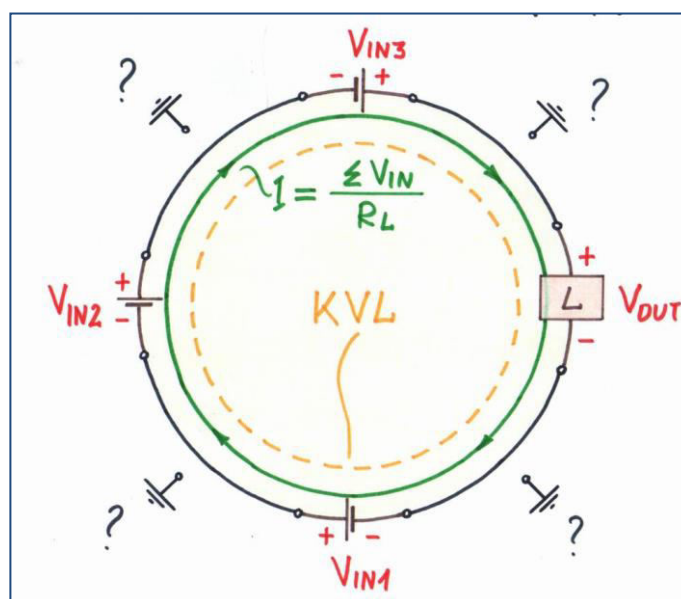
Суматор. В конкретния случай избираме най-простия начин за сумиране на напрежения – чрез последователно свързване на източниците (съгласно II закон на Кирхоф) и така сглобяваме възможно най-елементарния *последователен суматор на напрежения* (фиг. 2.20). Устройството му е пределно просто – само един контур (проводник).



Фиг. 2.20. Най-простият суматор на напрежения може да се направи, съгласно II закон на Кирхоф, чрез последователно свързване на източниците.

3. Обикновено възниква проблем.

В повечето случаи от практиката първото решение не е удачно (в противен случай бихме се задоволили с него и нямаше да направим изобретение).



Фиг. 2.21. Проблемът на общата маса е, че само две от устройствата (източници или източник и товар) могат да имат връзка с масата.

Суматор. В конкретния случай се натъкваме на основния за аналоговата схемотехника проблем на общата маса, който се състои в следното (фиг. 2.21). Отделните части на устройствата в схемотехниката (входни източници, товар и др.) обикновено са свързани с единия от изводите си към общата маса на системата (точката с условно нулев потенциал). В случай на двувходов суматор, ако приемем че входните източници са свързани с общата маса, изходът (товарът) остава „плаващ”. Правилото е, че за

да не възникне конфликт (късо съединение) между входните източници на напрежение, когато се опита да ги свържем последователно, трябва само две от устройствата да имат връзка с общата маса.

4. Търси се решение на проблема, но не може да се открие сред съществуващите решения в литературата.

Прави се опит да се намери решение на проблема в литературата, но съществуващите решения обикновено са компромисни и не ни задоволяват.

Суматор. В случай на двуходов суматор, например биха ни предложили да включим в изхода му преобразувател с диференциален вход и несиметричен изход, което е сложно и скъпо.

5. Разкрива се техническото противоречие.

За да се стигне до същността на проблема, трябва да се разкрие техническото противоречие. То обикновено звучи парадоксално (например, нещо трябва едновременно да съществува и да не съществува).

Суматор. В този случай излиза, че входните източници трябва едновременно да са свързани последователно и паралелно, което на практика е невъзможно.

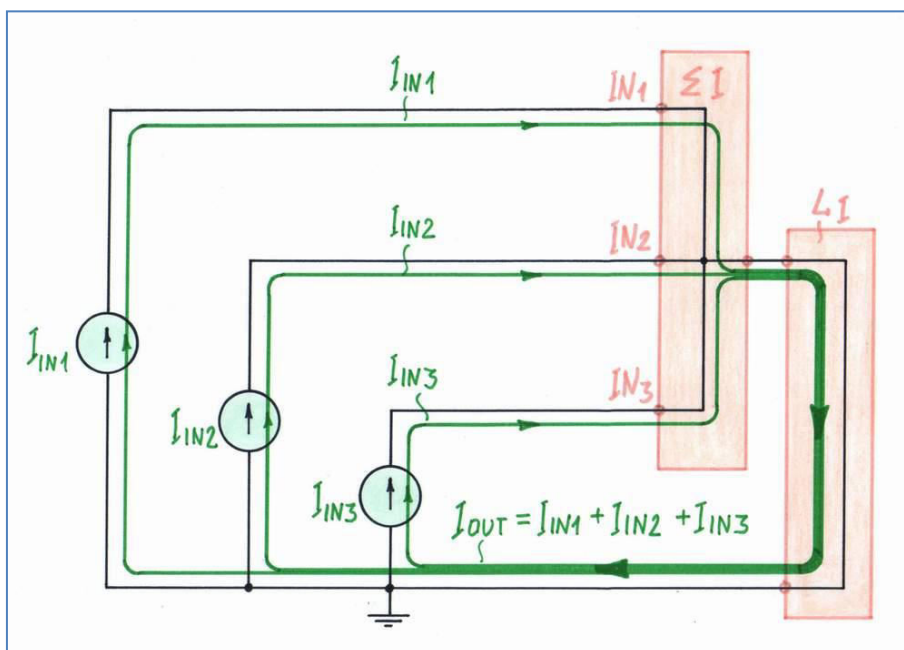
6. Търси се новата идея.

Така се стига до същинската част на изобретяването, която може да се осъществи в следната последователност:

- Прави се опит да се приложи някой от известните ни до този момент принципи за изграждане на електронни устройства (от колекцията с принципи).
- Стимулира се всячески възникването на нови идеи. За целта се използват всевъзможни методи за стимулиране на творческото мислене и се избягва срещата с „убийци на идеи”.
- Оставят се новите идеи да „изкристализират” спокойно, без да се нахвърляме върху тях, докато са още неоформени.

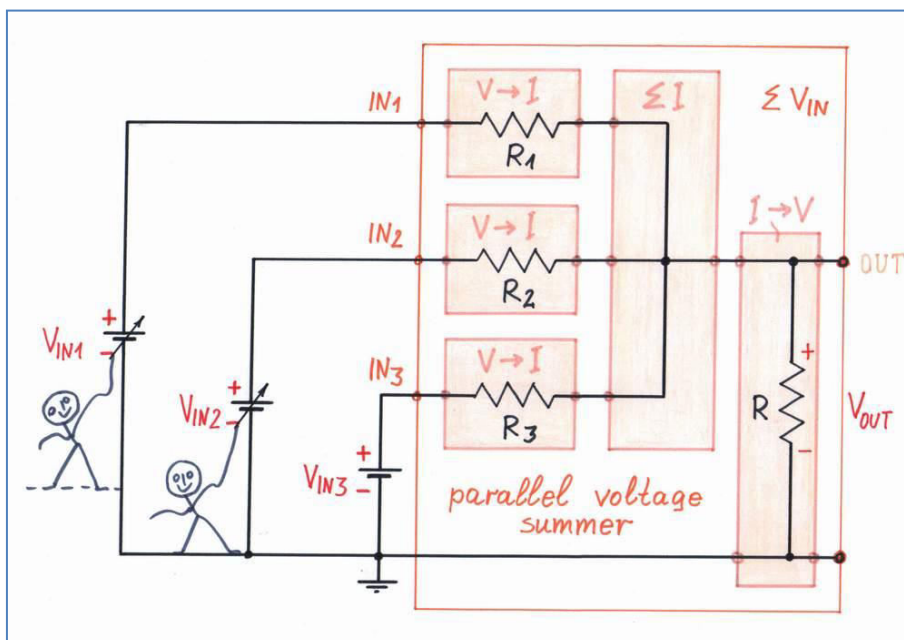
Суматор. Този, най-важен етап от изобретяването на суматора на напрежение, може да се осъществи в следните стъпки:

Стъпка 1. Щом като последователният начин за сумиране на напрежения, съгласно II закон на Кирхоф, не ни върши работа, тогава опитваме с *паралелния начин за сумиране на токове*, съгласно I закон на Кирхоф (фиг. 2.22). Така, както контурът представлява най-елементарният суматор на напрежения, възелът пък е най-елементарният *суматор на токове*. Той има предимството, че входните източници на ток и товарът са свързани към общата маса.



Фиг. 2.22. Един възел може да изпълнява функциите на най-елементарен суматор на токове.

Стъпка 2. Ние обаче искаме да сумираме напрежения. Затова трябва да ги преобразуваме в токове, като включим преобразуватели *напрежение-ток* между входните източници на напрежение и входовете на суматора (фиг. 2.23).



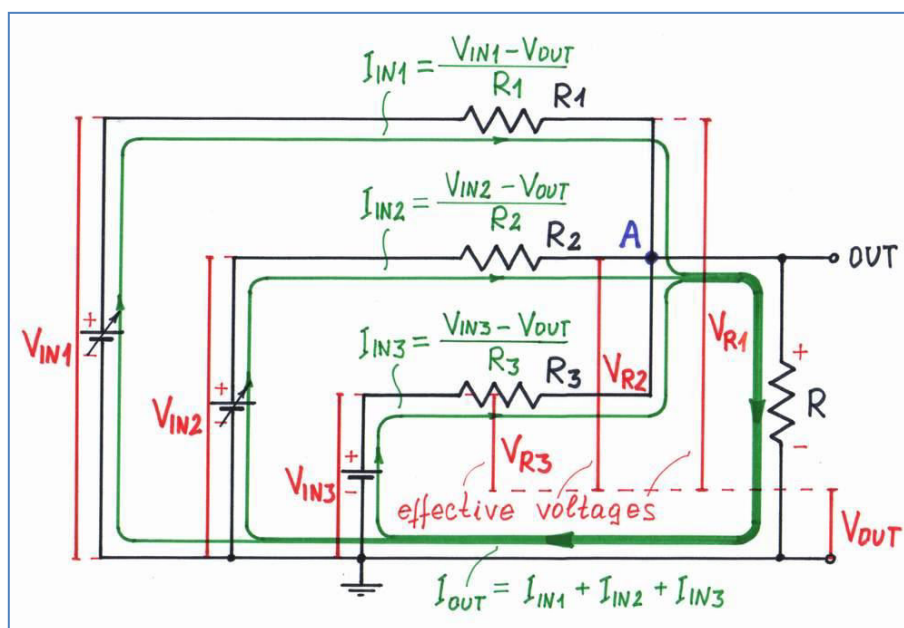
Фиг. 2.23. За да сумираме напрежения, включваме резистори на входовете на токовия суматор, действащи като преобразуватели *напрежение-ток*.

Тези пък преобразуватели можем да изобретим от елементарната електрическа верига на Ом, захранвана от източник на напрежение (т.е., приемаме, че напрежението обуславя тока). За целта, варираме с напрежението при постоянно съпротивление и отчитаме тока като изходна величина.

Стъпка 3. Полученият суматор обаче е с токов изход, а ние искаме да е напрежителен. Тогава включваме в изхода обратния преобразувател *ток-напрежение* (фиг. 2.23). Него можем да изобретим отново от елементарната електрическа верига на Ом, захранвана обаче от източник на ток (т.е., сега приемаме, че токът обуславя напрежението). За целта, варираме с тока при постоянно съпротивление и отчитаме напрежението като изходна величина.

7. Появява се следващ проблем.

Оказва се обаче, че падът на напрежение върху резистора R оказва влияние върху действието на схемата – фиг. 2.24.



Фиг. 2.24. Поради наличието на „вреден“ пад на напрежение върху резистора R , токовете през входните резистори зависят не от самите входни напрежения, а от разликата между тях и изходното напрежение.

8. Разкриваме новото техническо противоречие.

В схемата на паралелния резистивен суматор то е: *Напрежението V_R (съпротивлението R) трябва едновременно да съществува и да не съществува, защото то е полезно за товара, но е вредно за входните източници.*

9. Търси се следващата нова идея.

Започваме отново да търсим решение на проблема в заобикалящата ни действителност.

За конкретния случай забелязваме множество ситуации от нашето ежедневие, в които едно вредно смущение ни пречи да осъществим определена цел: разболяваме се – започваме да вземаме лекарства, докато не възстановим здравето си; уморени сме – почиваме; огладняваме – храним се; изразходваме пари – работим усилено, за да ги възстановим; появява се тегло в лявото блюдо на везната – унищожаваме го с „антитегло“ в дясното блюдо; правим нарушение и веднага си плащаме глобата и т.н.

10. Извличаме следващия изобретателски принцип.

Обобщаваме примерите и така извличаме нов изобретателски принцип, който можем да наречем образно „компенсиране на смущение чрез антисмущение“. В нашия електрически пример той гласи:

Подпомагаме входните източници с едно допълнително напрежение $V_S = V_R$, което копира активно пада на напрежение върху резистора R и го компенсира.

11. Прилагаме принципа в конкретната електрическа схема.

Сега остава само да приложим принципа в нашето конкретно устройство.

За целта разкъсваме веригата и включваме един компенсиращ източник последователно на резистора R , който изработва напрежение със същата стойност, което компенсира вредата, нанесена от съпротивлението R . За да почувстваме по-добре идеята, на този първи етап ние поемаме функциите на активен повторител – изменяме напрежението така, че то да бъде винаги равно на пада V_R върху резистора R (емпатия – т. 3.3.2).

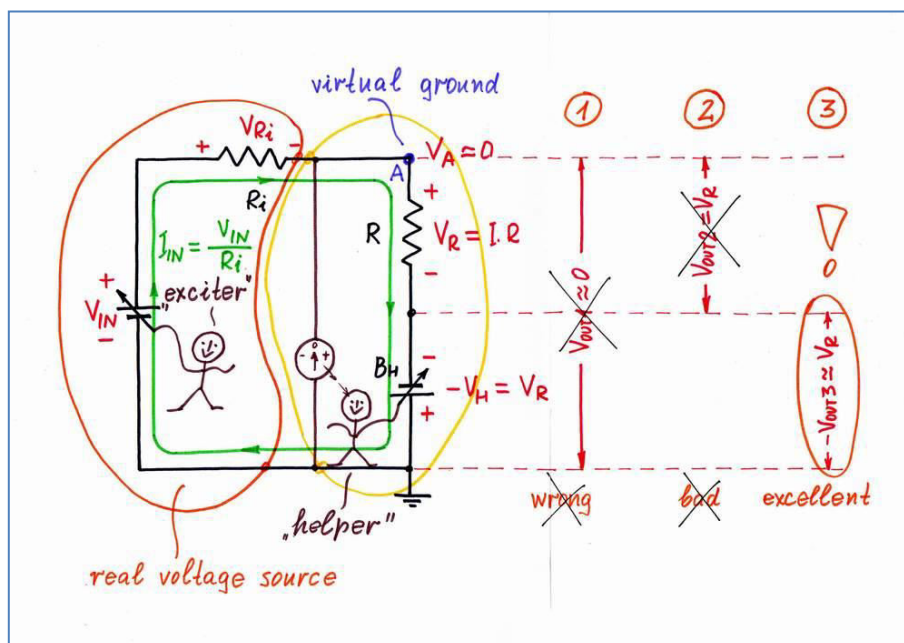
Сега остава да решим последния проблем – откъде да вземем изходния сигнал, т.е. къде да включим товара? В изхода на токовия суматор (положение 1 на фиг. 2.25) напрежението е вече унищожено и затова там е безсмислено да включваме товара. Върху резистора R има необходимото ни изходно напрежение, но ако включим към него товара (положение 2) възникват два проблема. Първо, товарът ще отклонява през себе си част от тока (особено, ако е нискоомен). Второ, товарът е „плаващ” (няма връзка с общата маса). Тогава къде е изходът на тази схема?

Ако се върнем към горните аналогии и си припомним как сме действали във всичките тези случаи, ще установим, че често използваме косвена, а не директна оценка: количеството лекарства, които приемаме, ни дават представа за нашето заболяване; доколко сме уморени се разбира от това, колко дълго почиваме; количеството храна, която поглъщаме, показва колко сме били огладнели; сумата от теглилки в едното блюдо на везната дава оценка на неизвестното тегло в другото блюдо и т.н.

Тези примери ни позволяват да усъвършенстваме принципа „унищожаване на смущение чрез антисмущение” в принцип „измерване на смущение чрез антисмущение”:

Представа за стойността на едно вредно смущение ни дава косвено стойността на полезното „анти-смущение”, чрез което сме го унищожили.

Сега вече знаем откъде да вземем изходния сигнал на инвертиращия суматор – *компенсиращото напрежение в изхода на операционния усилвател представлява точно инвертирано копие на оригиналното напрежение и това ще бъде изхода на схемата.*



Фиг. 2.25. Използваме компенсиращото напрежение на допълнителния източник като изходно напрежение (захранваме товара от „копието”, а не от „оригинала”). Така товарът консумира ток от допълнителния, а не от входния източник.

Етап II: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЕЙСТВИЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Първо схемата се подготвя за изследването, аналогично на съответните части от глави 2.1. и 2.2. След това се изследва последователно в следните стъпки, като се търсят необичайни входове:

1. Варира се последователно с параметрите на отделните ѝ елементи при постоянна стойност на входните величини

Това всъщност означава, че временно се отказваме от традиционните входове на схемата и търсим нови входни точки. Можем да използваме доста необичайни „входове” – захранващото напрежение, изхода на схемата, „вредни” величини (например, температурата) и др.

- В нашата схема на инвертиращ суматор можем да започнем да изменяме съпротивлението на резистора R , т.е. стойността на вредното смущение. Операционният усилвател реагира на това, като променя адекватно изходното си напрежение. Така изобретяваме преобразувателя „съпротивление-напрежение” и превръщаме смущението във входен сигнал. Разбира се, едно по-обичайно приложение на този феномен е мащабирането на изходния сигнал.
- След това можем да променяме съпротивлението на входните резистори ($R_1, R_2...$). Получаваме отново преобразуватели „съпротивление-напрежение”, но с обратни характеристики. Така можем да настройваме индивидуално тегловните коефициенти на отделните входове.
- Ако променяме съпротивлението на товара, ще се убедим отново, че схемата се държи като източник на неизменно напрежение.

2. Задълбочаваме изследването като изменяме едновременно няколко сигнала или параметъра на схемата.

На практика най-често се ограничаваме до две величини, които изменяме едновременно (синфазно) или противоположно (диференциално).

- Ако например, в схемата на инвертиращия суматор изменяме едновременно и противоположно входните напрежения, изходното напрежение няма да се изменя - идея за *диференциална схема*.
- По същия начин можем да изменяме едновременно и противоположно съпротивленията на входните резистори – получаваме *диференциален резистивен сензор* и т.н.

Етап III: ОБОБЩАВАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Идеите, извлечени при изобретяването на една конкретна електронна схема, може да се използват със същия успех и при изобретяването на други аналогични схеми (както беше направено в Етап 5 на глава 2.1). Ето как:

1. Прави се опит да се намери общото между принципите, лежащи в основата на изобретеното устройство и други, изобретени вече електронни устройства.

Всевъзможни други схеми с паралелна ООВ могат да бъдат изобретени чрез прилагане на същата идея (подпомагане на входния източник и използване на компенсиращото напрежение като изходен сигнал). Примери: „идеален” амперметър (фиг. 3.13), преобразуватели *ток-напрежение* (фиг. 3.14) и *напрежение-ток* (фиг. 3.16), инвертиращ усилвател (фиг. 3.17), интегратор (фиг. 3.18), диференциатор (фиг. 3.19), логаритматор (фиг. 3.25), антилогаритматор и др.

2. Принципът се прибавя към колекцията от принципи за изобретяване на електронни устройства.

В конкретния случай първо формулирахме универсалния (неелектрически) принцип *унищожаване на смущение чрез „антисмущение”*, който след това доразвихме в принципа *измерване на смущение чрез „антисмущение”*. След това го конкретизирахме в схемотехническия принцип *компенсиране на напрежение чрез „антинапрежение”* и измерване на напрежение чрез *„антинапрежение”*.

3. Начертава се блокова схема на устройството, реализиращо принципа и се прибавя към колекцията от блокови схеми.

3. РАЗРАБОТВАНЕ НА НАБОР ОТ ЕВРИСТИЧНИ СРЕДСТВА ЗА ФУНКЦИОНАЛНО ОПЕРИРАНЕ С ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

3.1. КОЛЕКЦИЯ ОТ БАЗОВИ ЕВРИСТИЧНИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИ ПРИНЦИПИ

В цялото разнообразие от електронни схеми и устройства може да се открият ясни и гениално прости фундаментални идеи, “трикове” и ефекти. Формулирането на универсални схемотехнически принципи и подреждането им в една йерархична система позволява не само да се анализират задълбочено действието на електронните схеми чрез разкриване на взаимната им връзка, но и да се създават, синтезират, псевдо-изобретяват и дори наистина да се изобретяват нови устройства.

“Инструментите”, с помощта на които може да се извличат и обобщават ценни идеи от огромната информационна маса са (т. 4.1): *пренасяне на интуитивни представи*, натрупани от житейския ни опит, върху електронните устройства; *търсене на асоциации и аналогии* между различни на пръв поглед устройства от различни области на схемотехниката; *разкриване на схемотехническите противоречия* в действието на електронните устройства; *функционална представа* за явленията в изследваните схеми, изграждана чрез еквивалентни схеми; *разкриване на причинно-следствените връзки* в изследваните явления; *изграждане на сензомоторни представи*; “образно” мислене и други методи на творческото мислене.

Общият брой на принципите е значителен и непрекъснато се обогатява. Обемът на настоящата работа не позволява всички те да бъдат включени. За илюстрация са показани само най-главните принципи в областта на аналоговата и цифровата схемотехника, които не са дадени наготово, а са извлечени от живота.

3.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ ВКЛЮЧВАНЕ НА ДОПЪЛНИТЕЛЕН ПРОПОРЦИОНАЛЕН ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИК

Това е една изключително проста, ясна и интуитивна, не само схемна, но и базова, фундаментална идея, която може да се наблюдава навсякъде в околния свят. Тя показва как може да се променят по един изкуствен начин съпротивителните свойства на пасивните обекти чрез включване на допълнителен енергиен източник, как да се „инжектира” енергия в тях така, че те да станат по-малко или повече пасивни и даже активни.

Един популярен „механичен” пример за прилагането на тази идея е спирачната серво-система на един автомобил. Ако по време на движение двигателят спре да работи при изключена скорост и водачът натисне педала на спирачката, той ще изпита значителна съпротива, защото вакуумният сервоусилвател не работи. Когато двигателят заработи и водачът натисне отново спирачката, той ще изпита намалена съпротива, защото вакуумният усилвател му „помага” чрез усилване на силата и прилагане към педала. Характерно за тази реализация е, че от съображения за сигурност усилвателят не е включен между водача и спирачката, а **паралелно** на водача.

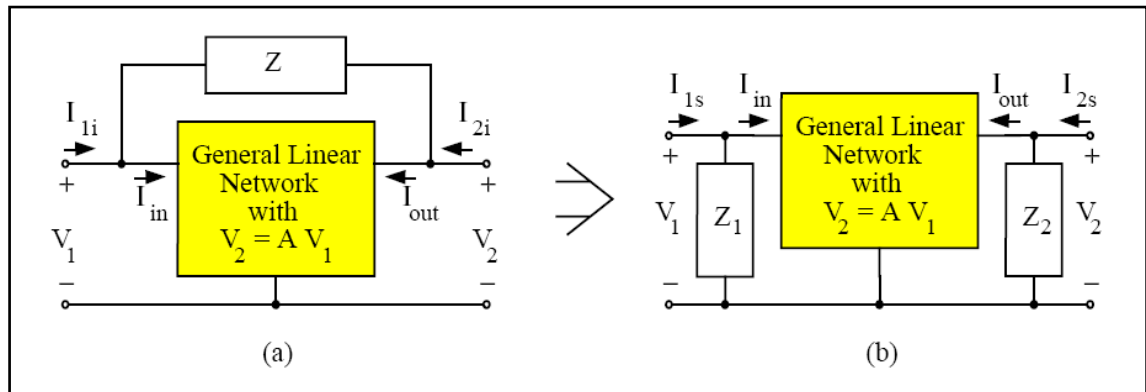
В най-общ вид тази идея се среща в двете си разновидности: *синергизъм* (съвместно действие, подпомагане) и *антагонизъм* (противопоставяне). В схемотехниката тя се реализира по два възможни начина, съгласно законите на Кирхоф – чрез *последователно свързване на източници на напрежение* и чрез *паралелно свързване на източници на ток*. В зависимост от това как са ориентирани източниците – еднопосочно или противоположно, се получават две разновидности.

3.1.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ВКЛЮЧВАНЕ НА ДОПЪЛНИТЕЛЕН ПРОПОРЦИОНАЛЕН ИЗТОЧНИК НА НАПРЕЖЕНИЕ (основна теорема на Милър за напреженията)

1. Класическо представяне

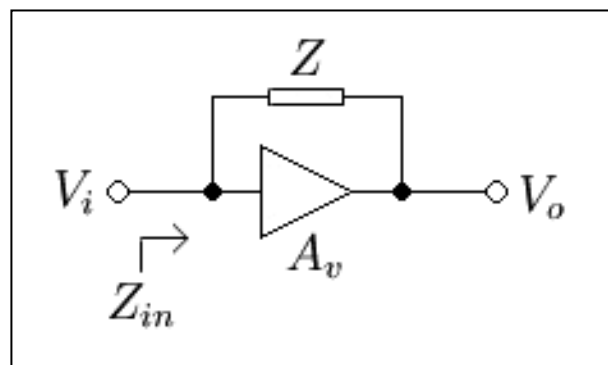
Теоремата на Милър е формулирана за целите на схемното проектиране [29]. Тя дава начини за преобразуване на сложни електронни схеми в по-прости еквивалентни схеми.

Теоремата гласи, че ако в една линейна схема съществува клон с импеданс Z , свързан между два възела с напрежения V_1 и V_2 (фиг. 3.1), този клон може да бъде заместен с два клона, свързващи съответните възли и масата, с импеданси $Z/(1 - K)$ и $KZ/(K - 1)$, където $K = V_2/V_1$. Накратко, теоремата гласи, че един „плаващ” импедансен елемент, захранван от два последователно свързани пропорционални източника на напрежение, може да бъде „разцепен” на два замасени елемента със съответните импеданси. Този вариант на теоремата е базиран на втория закон на Кирхоф (за напреженията) и затова понякога се нарича *теорема на Милър за напреженията*.



Фиг. 3.1. Постановка, илюстрираща преобразуването на импеданс чрез основната теорема на Милър за напреженията.

Теоремата на Милър може да бъде наблюдавана и реализирана в схеми, съдържащи елемент с импеданс Z , свързан между двата възела на "замасена" линейна верига. Обикновено усилвател на напрежение с коефициент на усилване $A_v = K$ служи като линейна верига (фиг. 3.2), но и други устройства могат да изпълняват тази роля (например, потенциометрична серво-система за измерване на напрежение [30]).



Фиг. 3.2. Реализация на теоремата на Милър за напреженията чрез усилвател на напрежение.

В много случаи входният източник има вътрешен импеданс Z_{int} (не е показан на фигурата) или е включен допълнителен импеданс, който в комбинация с импеданса Z въвежда обратна връзка. В зависимост от вида на усилвателя (неинвертиращ, инвертиращ или диференциален), обратната връзка може да бъде положителна, отрицателна или смесена.

Реализацията на теоремата на Милър има два аспекта. Първо, усилвателят може да бъде разглеждан като допълнителен източник на напрежение, преобразуващ истинския импеданс във виртуален (т.е., усилвателят модифицира импеданса на истинския елемент). Второ,

3.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ С ДОПЪЛНИТЕЛЕН ИЗТОЧНИК.

виртуалният импеданс може да бъде разглеждан като елемент, свързан паралелно към входа на усилвателя (в този случай виртуалният импеданс модифицира входния импеданс на усилвателя).

2. Разкриване на базовата идея на теоремата на Милър чрез функционален анализ.

Теоремата на Милър предполага, че импедансният елемент се захранва от два (не задължително зависими) източника на напрежение, свързани последователно през общата маса. На практика единият от тях действа като главен (независим) източник на напрежение V_1 , а другият – като допълнителен (линейно зависим) източник на напрежение $V_2 = KV_1$. Идеята на теоремата (модифициране на схемните импеданси, гледани от страната на входния източник и товара) може да бъде разкрита функционално [31] чрез сравняване на двете възможни ситуации – без и с включен допълнителен източник на напрежение V_2 .

Ако V_2 беше равно на нула (т.е., нямаше втори източник на напрежение или дясната страна на елемента с импеданс Z беше просто дадена на маса), входният ток, протичащ през елемента, би бил задаван само от напрежението V_1

$$I_{in0} = \frac{V_1}{Z}$$

и входният импеданс на схемата би бил:

$$Z_{in0} = \frac{V_1}{I_{in0}} = Z.$$

Понеже е включен вторият източник, входният ток зависи и от двете напрежения. В зависимост от полярността му, V_2 се изважда или прибавя от/към V_1 , така че токът се намалява/увеличава

$$I_{in} = \frac{V_1 - V_2}{Z} = \frac{(1 - K)V_1}{Z} = (1 - K)I_{in0}$$

и входният импеданс, гледан от страната на входния източник, съответно нараства/намалява

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_{in}} = \frac{Z}{1 - K}.$$

Следователно, теоремата на Милър изразява факта, че *включването на втори източник с пропорционално напрежение $V_2 = KV_1$ последователно на входния източник на напрежение V_1 променя ефективното напрежение, тока и съответно схемния импеданс, гледан от страната на входния източник*. В зависимост от полярността, V_2 действа като спомагателен източник на напрежение, подпомагащ или възпрепятстващ основния входен източник в стремежа му да прокара ток през импедансния елемент.

3.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ С ДОПЪЛНИТЕЛЕН ИЗТОЧНИК.

Това може да си обясним образно, ако си представим, че сме на мястото на входния източник (*емпатия* – т. 3.3.2) и не знаем стойността на включения към него импеданс. Затова решаваме да го определим косвено, като измерваме напрежението и тока, и изчисляваме отношението между тях, съгласно закона на Ом. Обаче ние не виждаме втория източник, който някой „шегобиец” е включил незабелязано от нас, последователно във веригата. Така ние сме излъгани, защото имаме чувството, че сме натоварени с нов виртуален импеданс $Z_{in} = Z/(1-K)$, а не със стария реален импеданс $Z_{in0} = Z$. Т.е., ние си мислим, че елементът, който виждаме е с импеданс Z_{in} , а не Z (сякаш елементът си е променил изкуствено импеданса).

Триктът е прост, но ефектен – във функцията на една променлива $I_{OUT} = V_{IN}/R$ (законът на Ом) се добавя още една променлива (напрежението на втория източник), която се променя едновременно с първата. Така в този диапазон фактически има функция на две променливи - $I_{OUT} = (V_{IN1} + V_{IN2})/R$, но ние продължаваме да я разглеждаме като функция на една променлива и затова оставаме с впечатлението, че импедансът се е променил. В действителност се е променил само токът, съответно входният импеданс на схемата, а импедансът на елемента си е същият.

Освен чрез представяне на комбинацията от двата източника на напрежение като един нов, съставен източник на напрежение, теоремата на Милър може да бъде обяснена функционално и чрез комбиниране на оригиналния елемент и втория източник на напрежение в един нов, *виртуален елемент с динамично модифициран импеданс*. От тази гледна точка, V_2 е допълнително напрежение, което изкуствено увеличава/намалява пада на напрежение върху импеданса Z и в резултат на това намалява/увеличава тока. Съотношението между напреженията определя стойността на получения импеданс и дава като цяло шест групи от типични приложения.

В зависимост от съотношението между допълнителното напрежение V_2 и входното напрежение V_1 , може да се получи *нормален, увеличен, безкрайно голям и отрицателен с инверсия на тока* виртуален импеданс (табл. 1). Съответно, в зависимост от съотношението между допълнителното напрежение V_2 и пада на напрежение V_z върху импеданса Z , може да се получи *нормален, намален, нулев и отрицателен с инверсия на напрежението* виртуален импеданс (табл. 2).

Табл. 1. Съотношението между V_2 и V_1 определя степента на увеличаване на импеданса.

Изваждане на V_2 от V_1				
V_2 спрямо V_1	$V_2 = 0$	$0 < V_2 < V_1$	$V_2 = V_1$	$V_2 > V_1$
Импеданс	нормален	увеличен	безкраен	отрицателен с инверсия на тока

Табл. 2. Съотношението между V_2 и V_z определя степента на намаляване на импеданса

Добавяне на V_2 към V_1				
V_2 спрямо V_z	$V_2 = 0$	$0 < V_2 < V_z$	$V_2 = V_z$	$V_2 > V_z$
Импеданс	нормален	намален	нулев	отрицателен с инверсия на напрежението

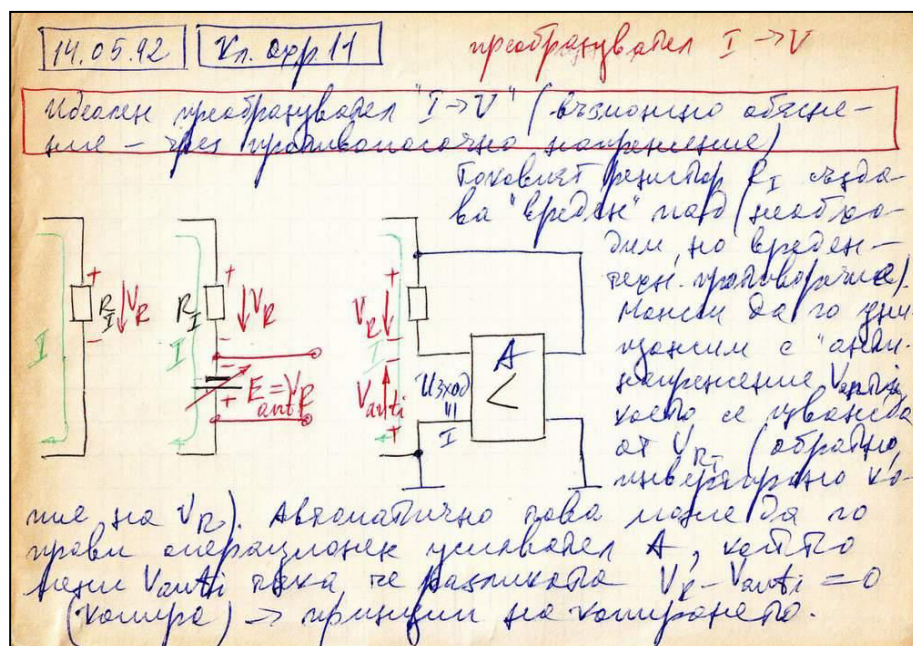
Импедансът, гледан от страната на изходния източник може да бъде определен чрез аналогични разсъждения, ако напреженията V_1 и V_2 бъдат разменени и коефициентът K се замести с $1/K$

$$Z_{in2} = \frac{KZ}{K-1}.$$

3. Нова интерпретация на теоремата на Милър.

Представена по класическия начин, теоремата на Милър е само едно средство за преобразуване на сложни схеми в по-прости еквивалентни схеми, което намира приложение при анализа и синтеза на електронните схеми в схемното проектиране.

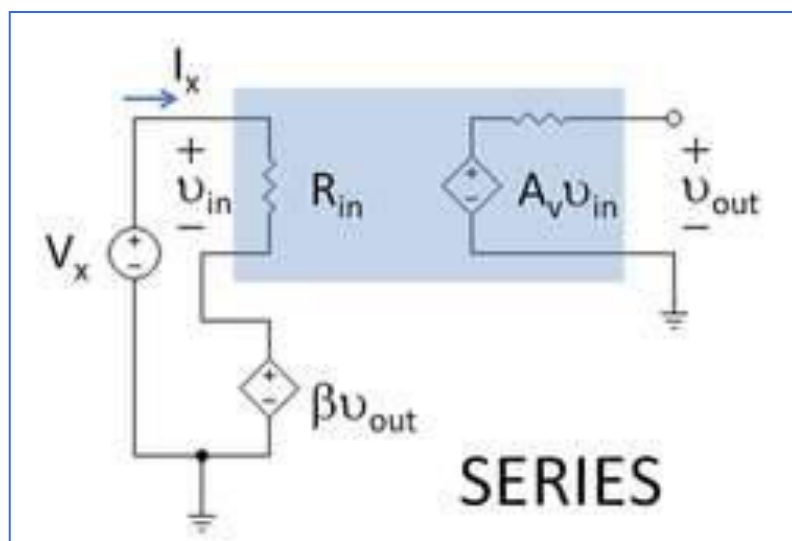
В настоящата работа идеята на теоремата на Милър е разширена и обобщена до принцип за модифициране на схемните параметри (импеданс за линейните и волт-амперни характеристики за нелинейните). Той обяснява фундаментални схемни феномени (ефект на Милър, виртуална маса, буутстрапинг, отрицателен импеданс и др.), подпомага разбирането и конструирането на множество популярни базови схеми (усилватели с отрицателна обратна връзка, резистивни и зависими от времето преобразуватели, преобразуватели на отрицателно съпротивление и др.) и позволява да бъдат изобретени нови електронни схеми. Предложени са общо шест правила за модифициране на схемни параметри – първите три са за виртуално увеличаване, а останалите три - за виртуално намаляване на импеданс. Тези идеи се зараждат у автора в началото на 90-те, без тогава той да предполага съществуването на Милъровата теорема (фиг. 3.3).



Фиг. 3.3. Автентични записки на автора от началото на 90-те, когато започва осъзнаването на теоремата на Милър с нейните проявления.

А. ВИРТУАЛНО УВЕЛИЧАВАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ИЗВАЖДАНЕ НА ПРОПОРЦИОНАЛНО НАПРЕЖЕНИЕ

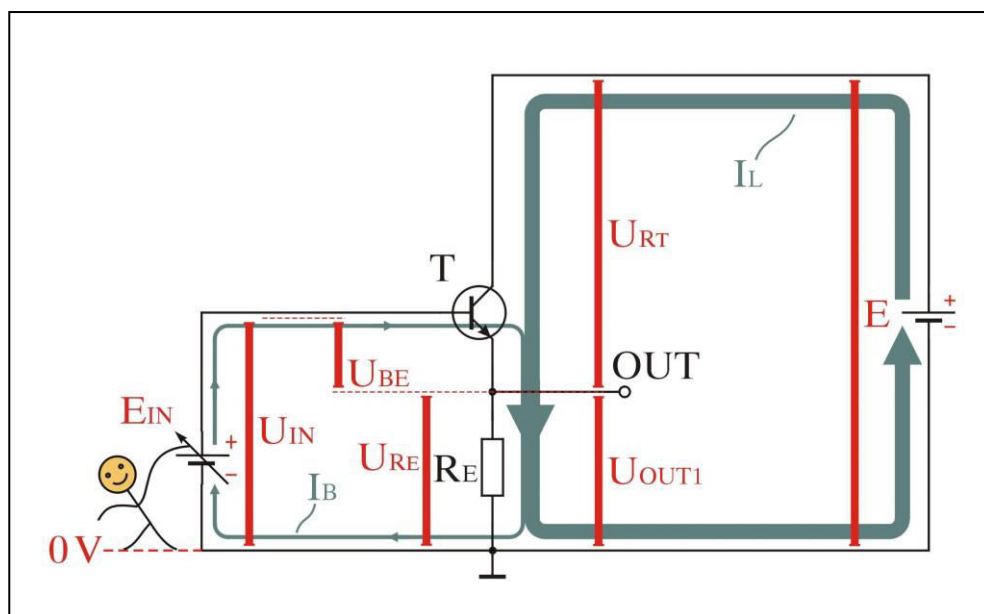
Ако допълнителното напрежение се включи с обратна полярност спрямо входното при обхождане на контура (по отношение на масата полярностите на двете напрежения да са еднакви), то се изважда от входното (фиг. 3.4). В резултат на това, ефективното напрежение, приложено върху елемента и токът, протичащ през него намаляват, а входният импеданс се увеличава.



Фиг. 3.4. Включването на допълнително пропорционално напрежение с обратна полярност последователно на входното увеличава виртуално входния импеданс на схемата.

С тази постановка могат да бъдат обяснени широк клас от съществуващи схеми и може да се изобретят нови схеми с виртуално увеличен, безкрайно голям и отрицателен импеданс.

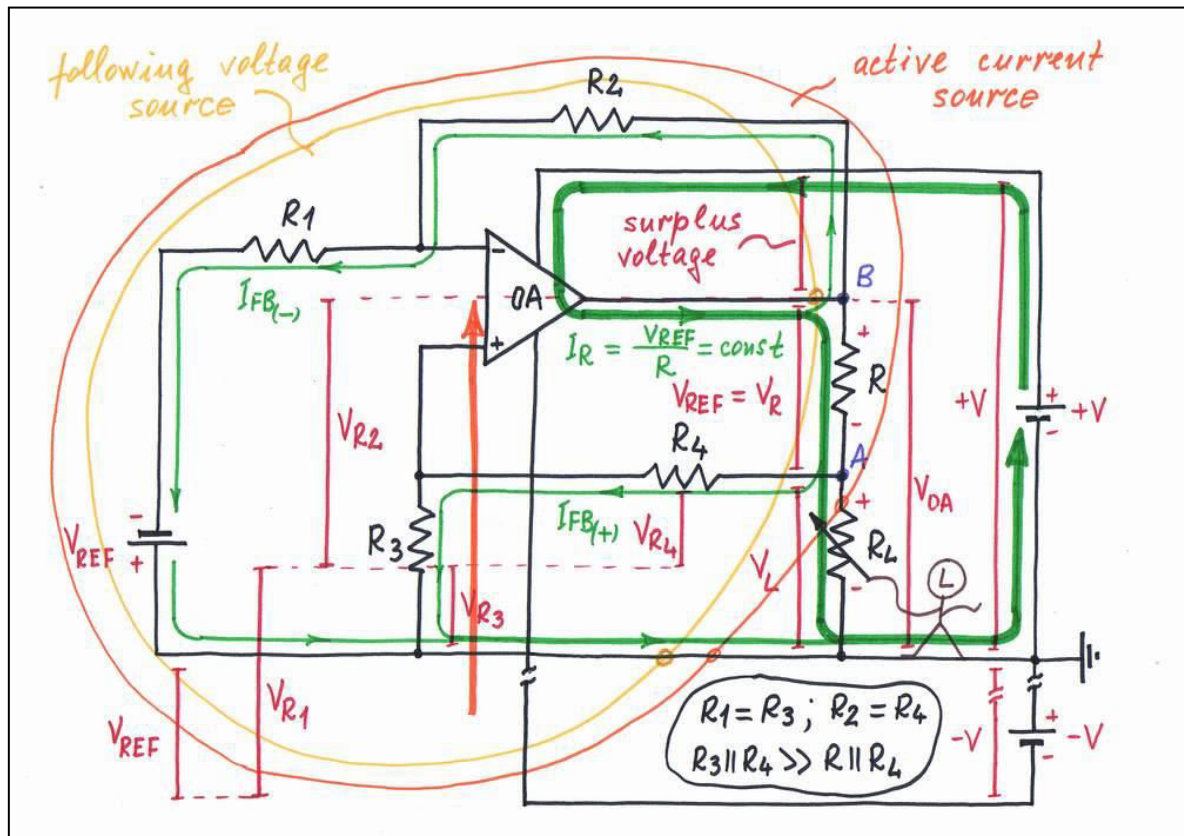
Умерено увеличаване на импеданс. Може да се реализира чрез неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване $0 < K < 1$. Изходното му напрежение е по-малко от входното и го „неутрализира“ частично. Входният източник е по-малко натоварен; той е „излъган“, защото „има приятното чувство“, че елементът е увеличил импеданса си по някакъв вълшебен начин. Примери за това са несъвършените повторители (емитерен – фиг. 3.5, сорсов, катоден и т.н.) и усилвателите с последователна отрицателна обратна връзка (например с емитерна дегенерация), чийто входен импеданс е увеличен умерено.



Фиг. 3.5. В схемата на един емитерен повторител напрежението на емитера „неутрализира“ частично напрежението на базата и в резултат на това входното съпротивление се увеличава многократно (до $1 + \beta R_E$).

Получаване на безкрайно голям импеданс. В този случай се използва неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване $K = 1$. Изходното му напрежение е равно на входното и го „неутрализира“ напълно. Сега входният източник изобщо не е натоварен; той е отново „излъган“, защото „има изключително приятното чувство“, че елементът е увеличил импеданса си до безкрайност (т.е., на практика няма елемент и източникът работи на празен ход). Типични примери са потенциометричният метод за измерване на напрежения и повторителите (усилвателите) с последователна отрицателна обратна връзка, реализирани с операционни усилватели (например, неинвертиращият усилвател – фиг. 3.6).

Тази техника за изкуствено увеличаване на съпротивлението до безкрайност е известна под името *буутстрапинг (bootstrapping)* и се използва широко в схемите за осигуряване на преднапрежение, схемите за неутрализиране на утечни токове във входовете на високоимпедансни (електрометрични) усилватели и др. Така например, в схемата на един двупосочен (*bilateral*) източник на ток (фиг. 3.7) потенциалът в горната точка на резистора R се поддържа равен на потенциала в долната му точка. В резултат на това, падът на напрежение върху резистора R и токът протичащ през него и товара са постоянни (схемата се държи като източник на постоянен ток).



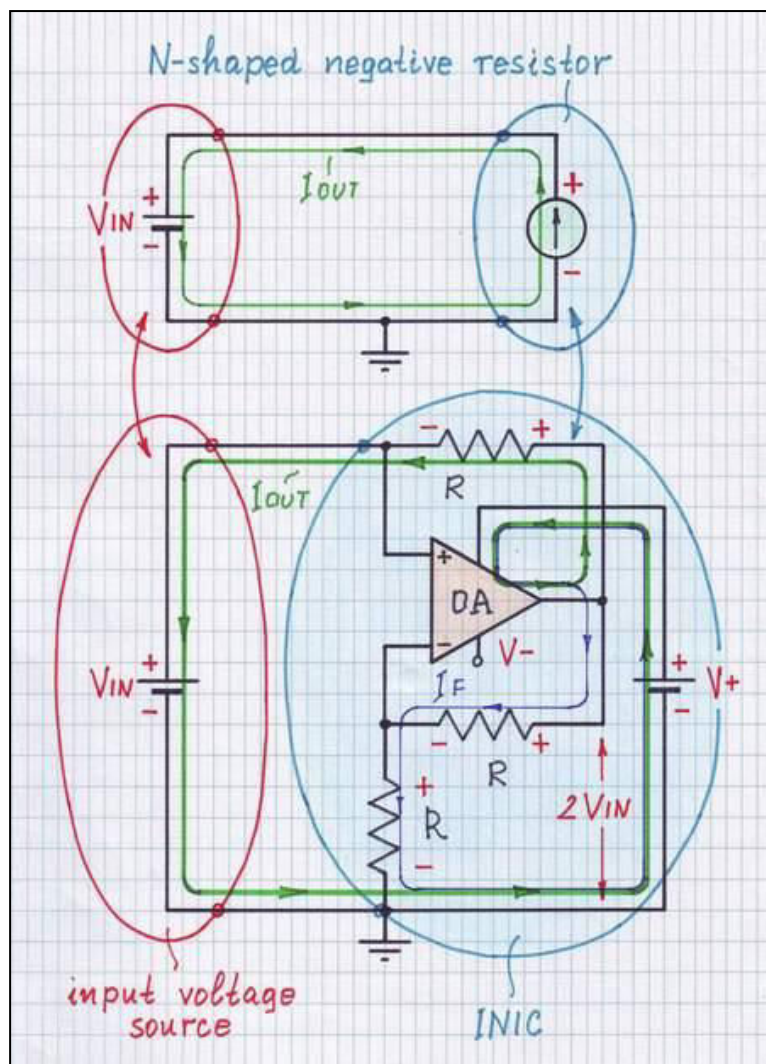
Фиг. 3.8. Идеята на двупосочния (*bilateral*) източник на ток, разкрита чрез визуализиране на действието с помощта на напрежителни стълбчета и токови контури.

Получаване на отрицателен импеданс чрез инвертиране на тока. Реализира се чрез неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване $K > 1$ [32].

В този случай, токът сменя посоката си, защото изходното напрежение е с по-голяма стойност от входното. Входният източник на напрежение трябва да има достатъчно малък (дори нулев) импеданс Z_{int} , за да бъде схемата устойчива. Ако входният източник има някакъв вътрешен импеданс, или е свързан чрез елемент с допълнителен импеданс, се появява положителна обратна връзка. Типично приложение е преобразувателят на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC) – фиг. 3.9, който използва едновременно отрицателна и положителна обратна връзка (чрез отрицателната е реализиран неинвертиращ усилвател, а чрез положителната се модифицира импеданса). Едно обяснение на функционално ниво е следното.

Схемата се държи като резистор с отрицателно съпротивление и N-образна волт-амперна характеристика, който генерира (за разлика от резистора с „положително” съпротивление, който консумира) ток $I_{OUT} = V_{IN}/R$, пропорционален на напрежението V_{IN} , приложено към

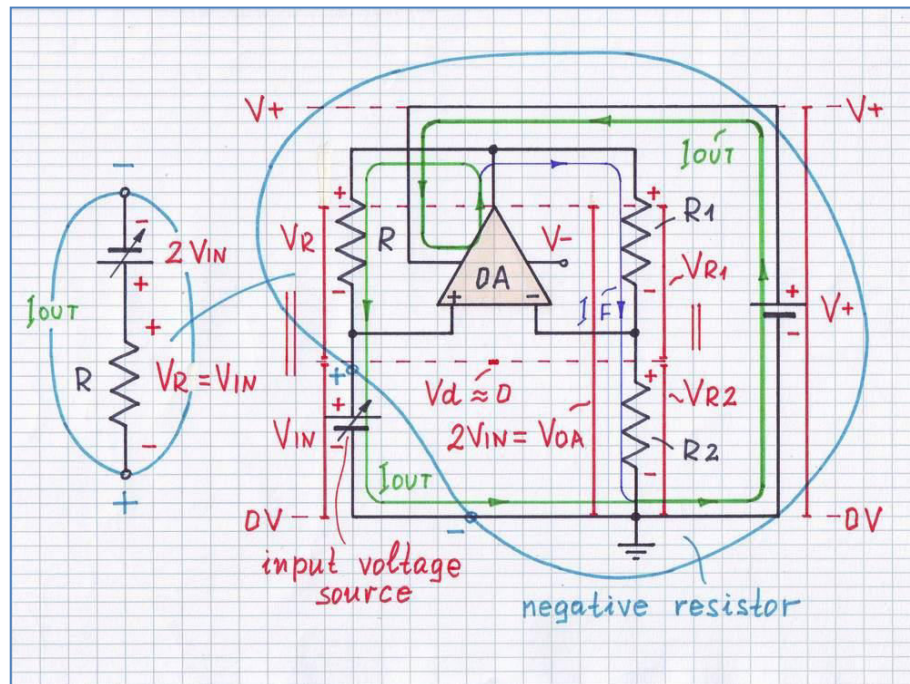
него. Този ток е еквивалентен на тока, който би протекъл през съответния резистор с „положително” съпротивление R при прилагане на напрежението V_{IN} върху него.



Фиг. 3.9. В схемата на един преобразувател на отрицателно съпротивление от типа INIC допълнителното напрежение отдясно на резистора R е по-високо от входното напрежение. В резултат на това, токът сменя посоката си и входното съпротивление става отрицателно.

Операционният усилвател сякаш преобразува „положителното” съпротивление R в отрицателно $-R$, затова схемата е наречена *преобразувател на отрицателно съпротивление*. Тя може да се разглежда като съставена от два елемента: резистор с „положително” съпротивление R (в горната част на фигурата) и неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване 2, който усилва входното напрежение. Усилвателят е изпълнен чрез операционен усилвател и два резистора с еднакво съпротивление $R_1 = R_2 = R$ (фиг. 3.10), образуващи делител на напрежение с коефициент 0,5. Така цялата схема действа като „подпомагащ” източник на ток, който „инжектира” ток I_{OUT} през горния резистор R във входния източник, опитвайки се да повиши

напрежението му. Понеже токът, протичащ през схемата, има обратна посока спрямо тока, който би протичал през „положителния” резистор R , схемата е наречена *преобразувател на отрицателно съпротивление с инверсия на тока*.



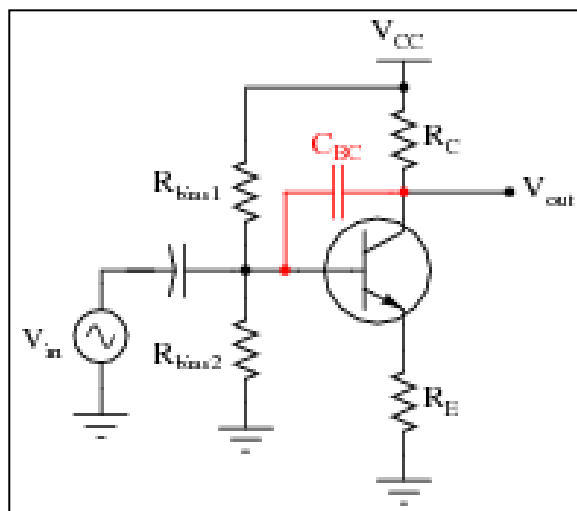
Фиг. 3.10. В участъка с отрицателно съпротивление операционният усилвател се държи като един вариращ източник на напрежение $2V_{IN}$ и вътрешно съпротивление R (илюстрация с напрежителни стълбчета и токови контури).

На фиг. 3.11 е показано как се формира участък с отрицателно съпротивление на волт-амперната характеристика. В участъка между точки 0 и 2 (в кафяво) операционният усилвател е наситен в отрицателна посока и се държи като източник на отрицателно напрежение с „положително” вътрешно съпротивление R . Феноменът на отрицателното съпротивление започва да се проявява в точка 2, където операционният усилвател излиза от насищане и започва да работи в активен режим. Напрежението на инвертиращия му вход е приблизително равно на напрежението на неинвертиращия му вход. Показаният на фиг. 3.11 случай е за участъка 3-4, когато входният източник подава ниско напрежение $V_{IN} < V_{SAT+}/2$ към схемата. В резултат на това, операционният усилвател премества волт-амперната си характеристика (успоредна сама на себе си) надясно и пресечната работна точка се плъзга по новата динамична волт-амперна характеристика на един отрицателен резистор. Това не е реална, а една изкуствена, въображаема характеристика с отрицателен наклон, преминаваща през началото на координатната система.

Б. ВИРТУАЛНО НАМАЛЯВАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ПРИБАВЯНЕ НА ПРОПОРЦИОНАЛНО НАПРЕЖЕНИЕ

Ако допълнителното напрежение се включи със същата полярност спрямо входното при обхождане на контура (по отношение на масата, полярностите на двете напрежения да са противоположни), то се прибавя към входното. В резултат на това, ефективното напрежение, приложено върху елемента и токът, протичащ през него се увеличават, а входният импеданс се намалява. С тази постановка могат да бъдат обяснени широк клас от съществуващи схеми и може да се изобретят нови схеми с виртуално *намален*, *нулев* и *отрицателен* импеданс.

Умерено намаляване на импеданс. Реализира се най-често чрез инвертиращ усилвател с умерено голям коефициент на усилване (типично $10 < K < 1000$), обхванат от отрицателна обратна връзка. Изходното му напрежение е по-малко от напрежителния пад върху елемента и го „неутрализира” частично. Входният източник е повече натоварен; сега той „има неприятното чувство”, че елементът е намалил импеданса си. Този случай може да се наблюдава като нежелан ефект на Милер в усилвателните стъпала *общ емитер*, *общ сорс* и *общ катод*, където ефективния входен капацитет се увеличава виртуално (фиг. 3.12). Полезни примери са честотната компенсация в операционните усилватели и транзисторният интегратор на Милър.

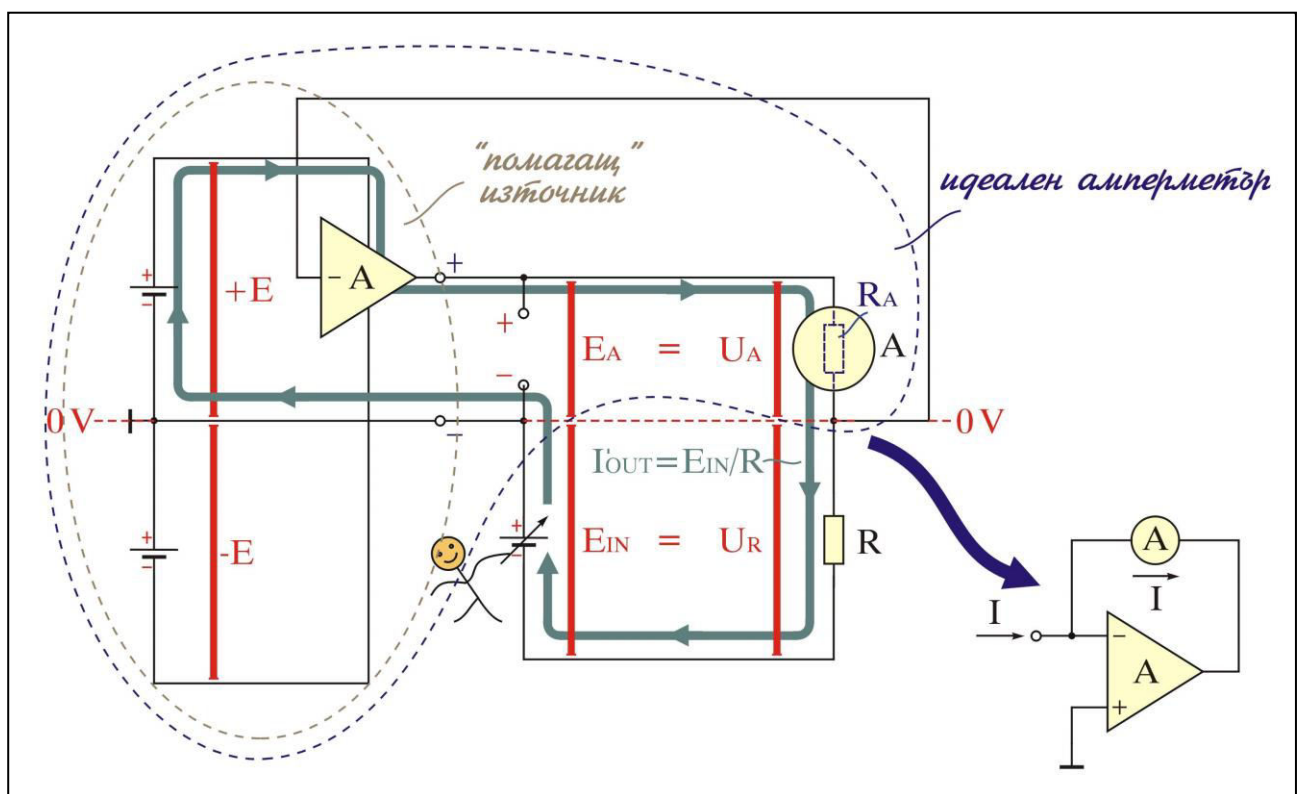


Фиг. 3.12. В едно транзисторно усилвателно стъпало схема *общ емитер* колекторното напрежение на транзистора „неутрализира” частично напрежителния пад върху капацитета C_{BC} и така привидно увеличава ефективния входен капацитет (известно като *ефект на Милър*).

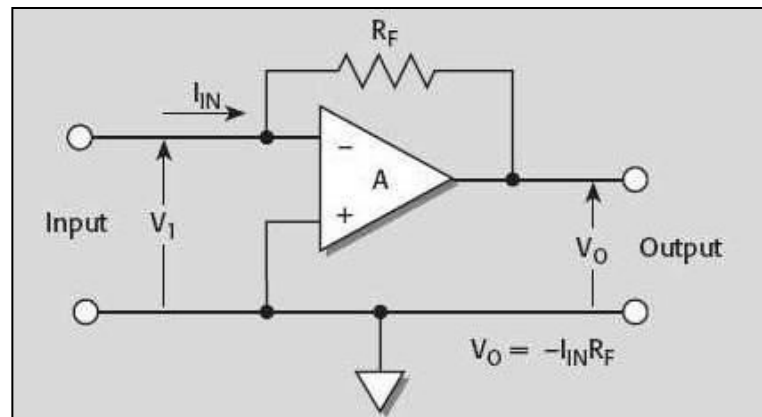
Нулиране на импеданс. Реализира се чрез инвертиращ операционен усилвател с много голям коефициент на усилване $K \rightarrow \infty$, обхванат от отрицателна обратна връзка. Изходното му напрежение е почти равно на напрежителния пад върху елемента и го „неутрализира” напълно. Схемата се държи като верига с нулев импеданс (късо съединение) и на входа ѝ се появява

виртуална маса, което изисква да бъде управлявана от източник на ток (сега той „има изключително приятното чувство“, че работи „накъсо“). За тази цел, някои популярни схеми са управлявани от източник на неизменен ток или от реален източник на напрежение с вътрешно съпротивление. Примери: „идеален“ амперметър, „идеален“ преобразувател напрежение-ток [33] и ток-напрежение [34], капацитивен интегратор (наричан още токов интегратор или усилвател на заряд), преобразувател съпротивление-напрежение (резистивен сензор, свързан на мястото на импеданса Z) и др.

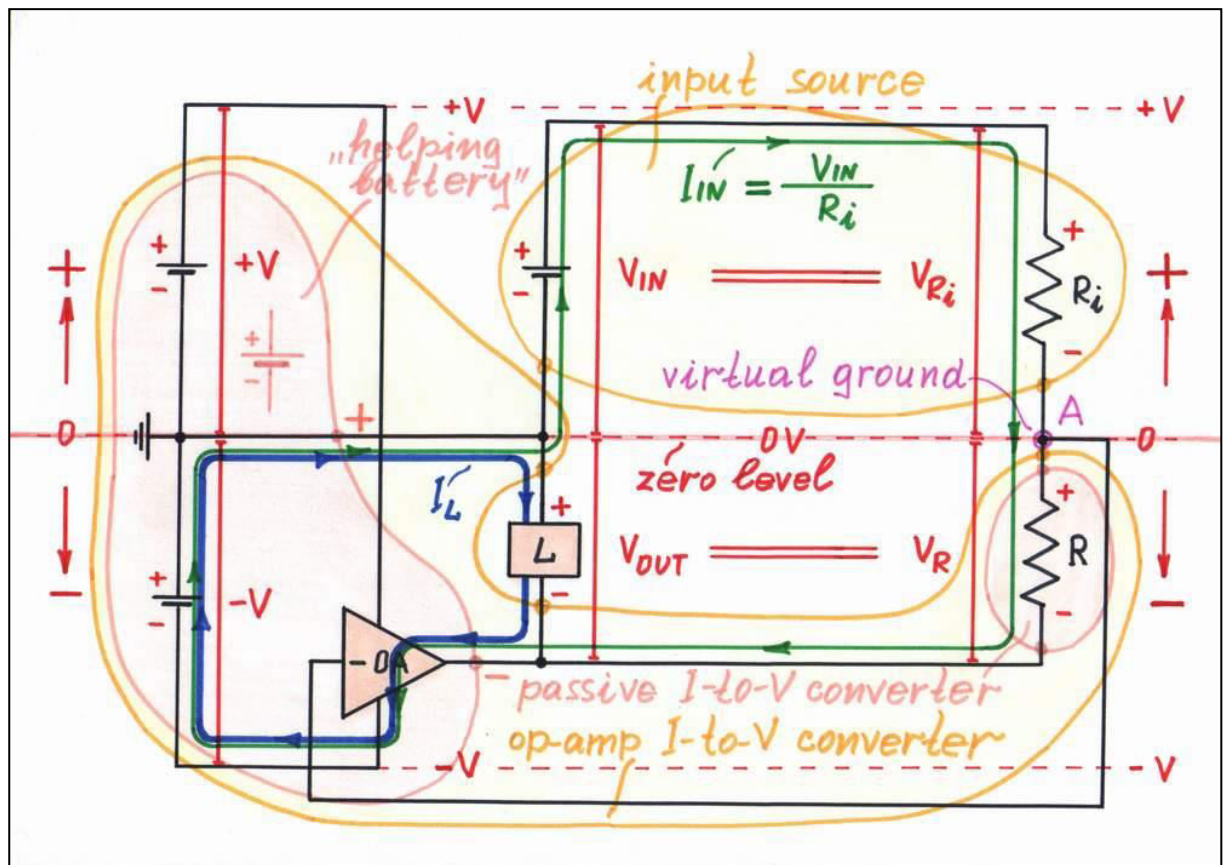
Така например, в схемата на един „идеален“ амперметър (фиг. 3.13), операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху несъвършения амперметър и така го „неутрализира“ напълно. Схемата се държи като верига с нулево съпротивление (късо съединение) и на входа ѝ се появява виртуална маса. Аналогично, в схемата на един „идеален“ преобразувател *ток-напрежение* (фиг. 3.14 и фиг. 3.15), операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху измервателния резистор R и го „неутрализира“ напълно.



Фиг. 3.13. В схемата на един „идеален“ амперметър, операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху несъвършения амперметър и така го „неутрализира“ напълно.

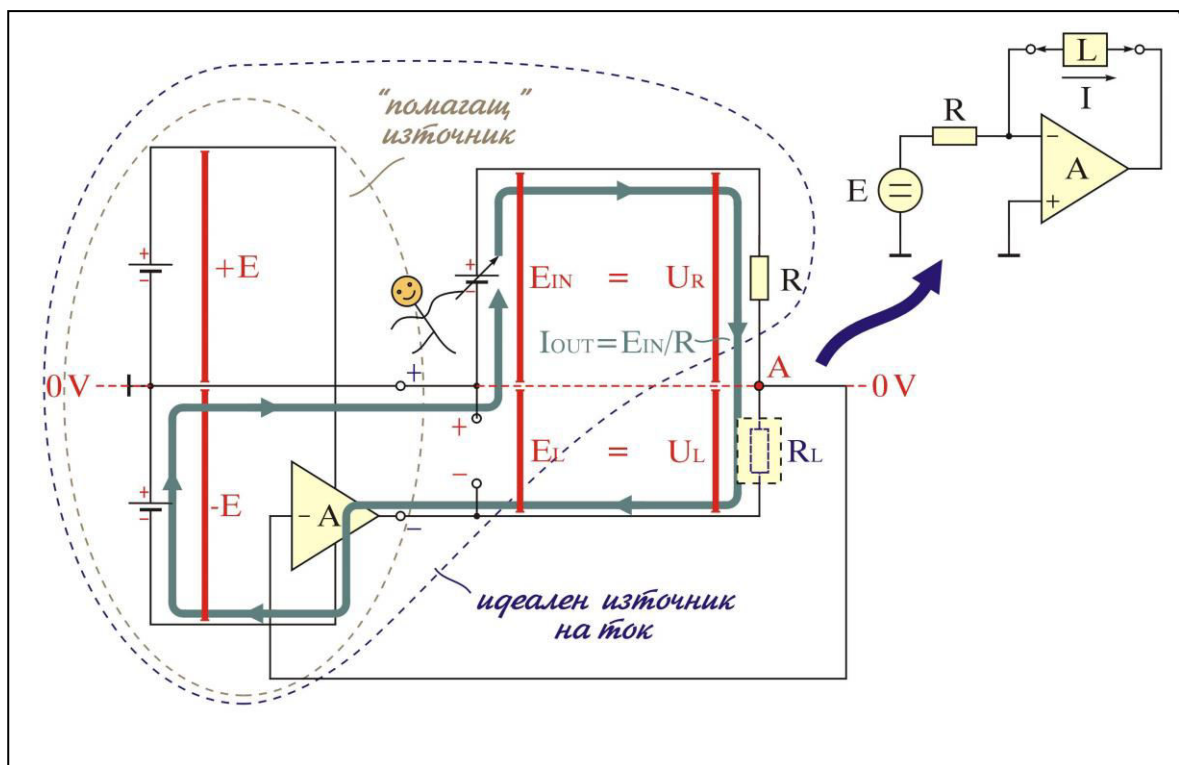


Фиг. 3.14. В един „идеален” преобразувател *ток-напрежение*, усилвателят добавя напрежение, равно на пада върху резистора R_F и го „неутрализира” напълно. Схемата има нулево входно съпротивление.

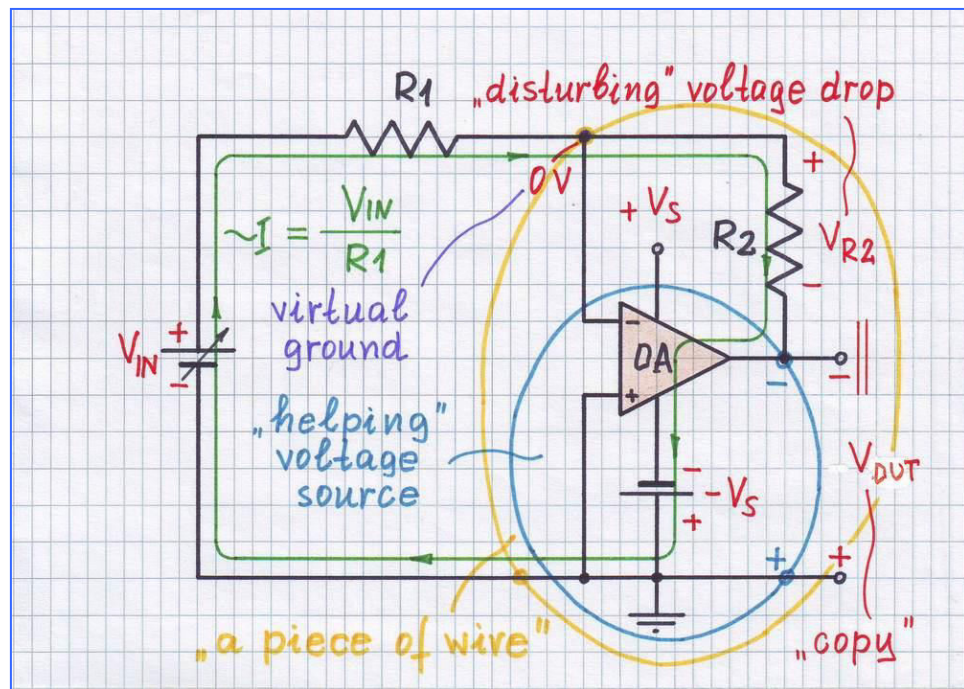


Фиг. 3.15. Действието на „идеалния” преобразувател *ток-напрежение* е визуализирано чрез напрежителни стълбчета и токови контури, нанесени върху подходящо начертана разгъната схема („положителната” част на схемата е начертана над нулевата потенциална линия, а „отрицателната” – под нея).

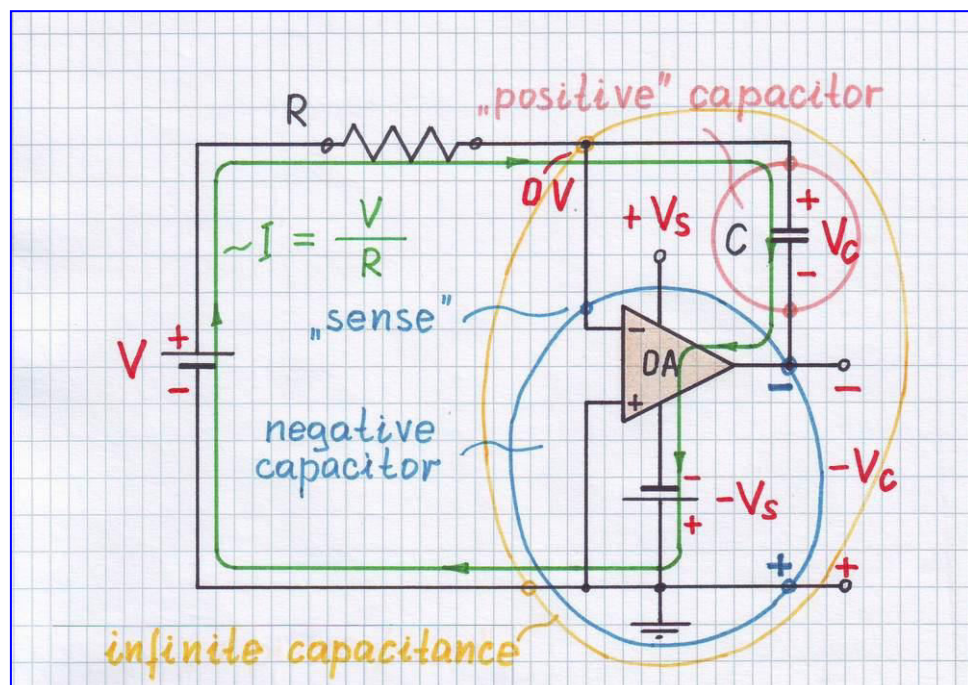
Останалите схеми имат допълнителен импедансен елемент, свързан последователно на входа. Примери: „идеален” преобразувател напрежение-ток, инвертиращ усилвател, сумиращ усилвател, индуктивен диференциатор, капацитивен интегратор, резистивно-капацитивен интегратор, капацитивно-резистивен диференциатор, индуктивно-резистивен диференциатор и др. Така например, в схемата на един „идеален” източник на ток (преобразувател *напрежение-ток*) - (фиг. 3.16), операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху товара L и така го „неутрализира” напълно. В резултат на това, схемата (комбинацията $L + A$) се държи като „идеален” товар с нулево съпротивление, който дава „накъсо” входния източник на ток (комбинацията $E + R$). Аналогично, в един инвертиращ усилвател (фиг. 3.17), операционният усилвател компенсира напрежителния пад върху резистора R_2 , в интегратора на напрежение (фиг. 3.18) – пада върху кондензатора C , в индуктивния диференциатор (фиг. 3.19) – пада върху бобината L и т.н.



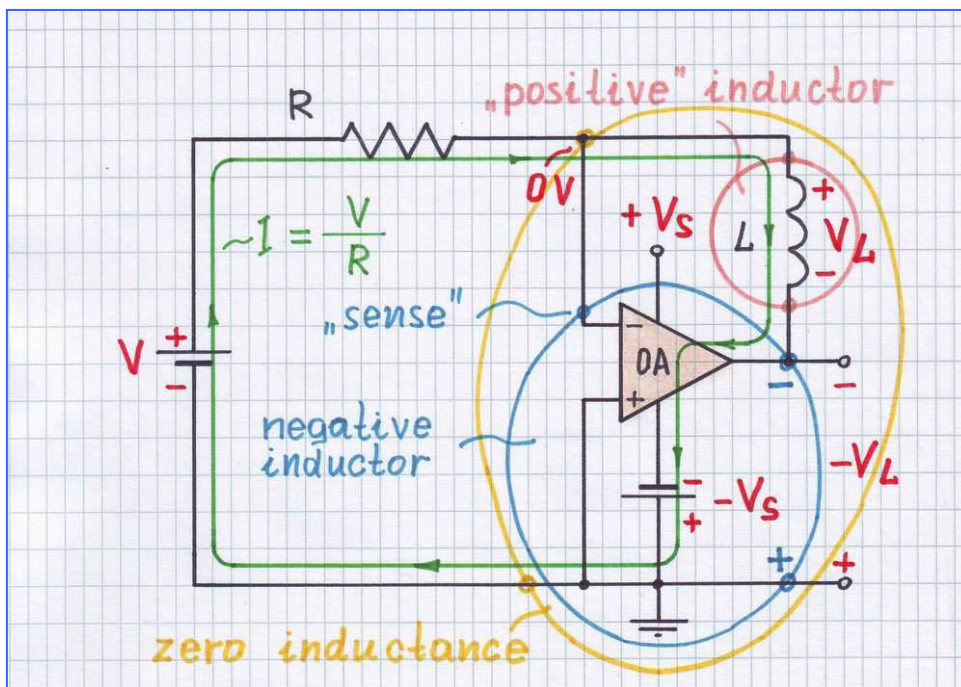
Фиг. 3.16. В схемата на един „идеален” източник на ток (преобразувател *напрежение-ток*), операционният усилвател „неутрализира” напълно напрежителния пад върху товара L чрез еквивалентно напрежение. Дясната част на схемата ($L + A$) се държи като верига с нулево съпротивление (късо съединение, идеален токов товар).



Фиг. 3.17. В схемата на един инвертиращ усилвател операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху резистора R_2 и го „неутрализира“ напълно. Дясната част на схемата ($R_2 + OA$) се държи като верига с нулево съпротивление (късо съединение).

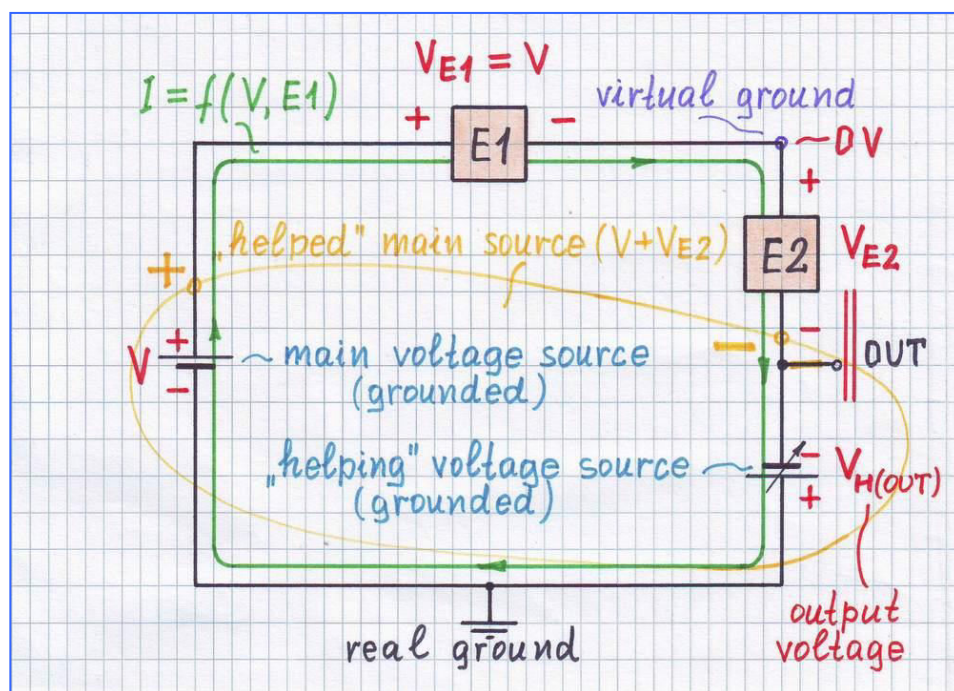


Фиг. 3.18. В схемата на един „идеален“ интегратор на напрежение операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху кондензатора C и го „неутрализира“ напълно. Дясната част на схемата ($C + OA$) се държи като „идеален“ кондензатор с безкрайно голям капацитет.

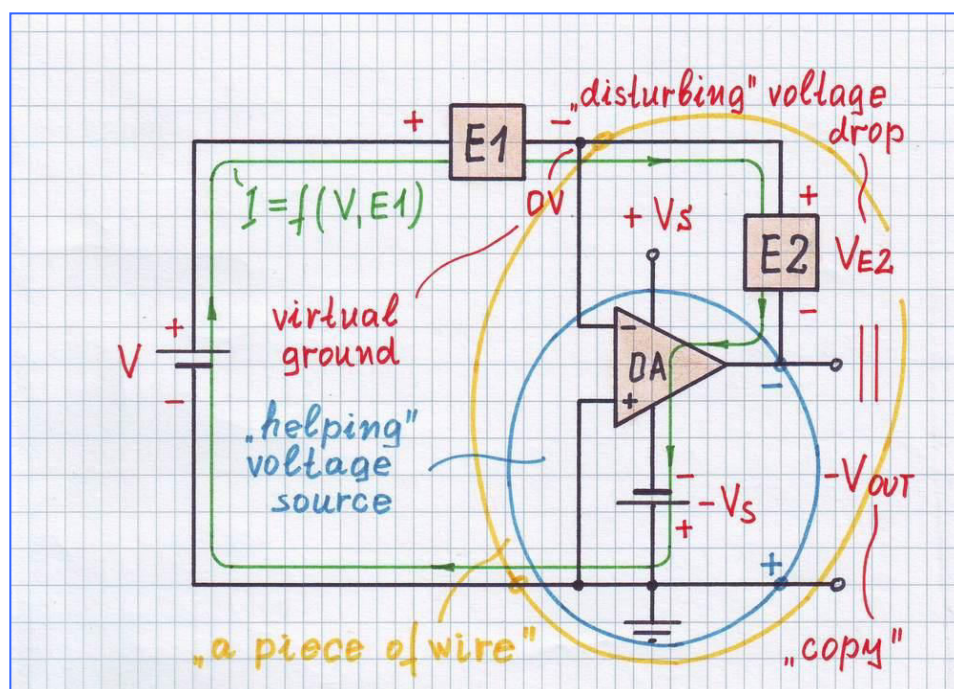


Фиг. 3.19. В схемата на един „идеален” индуктивен диференциатор на напрежение операционният усилвател добавя допълнително напрежение, равно на напрежителния пад върху бобината L и го „неутрализира” напълно.

Чрез прилагане на този функционален подход, всички инвертиращи схеми с паралелна отрицателна обратна връзка могат да бъдат обобщени чрез еквивалентна електрическа схема (фиг. 3.20) и чрез по-конкретна обобщена електронна схема, реализирана с операционен усилвател (фиг. 3.21). Те са представени като съставени от две каскадно свързани устройства: идеален преобразувател *напрежение-ток* (E_1) и идеален преобразувател *ток-напрежение* ($E_2 + V_H$). Тези преобразуватели са идеални, защото подпомагащият източник V_H (подходящо захраненият операционен усилвател ОА на втората фигура) компенсира загубите в елемента E_2 , като прибавя допълнително напрежение $V_H = V_{E2}$, равно на напрежителния пад върху елемента E_2 . В резултат на това, входният ток е увеличен до максималната си стойност, определена само от входното напрежение и допълнителният импеданс E_1 (този ток не зависи от стойността на импеданса на елемента E_2).

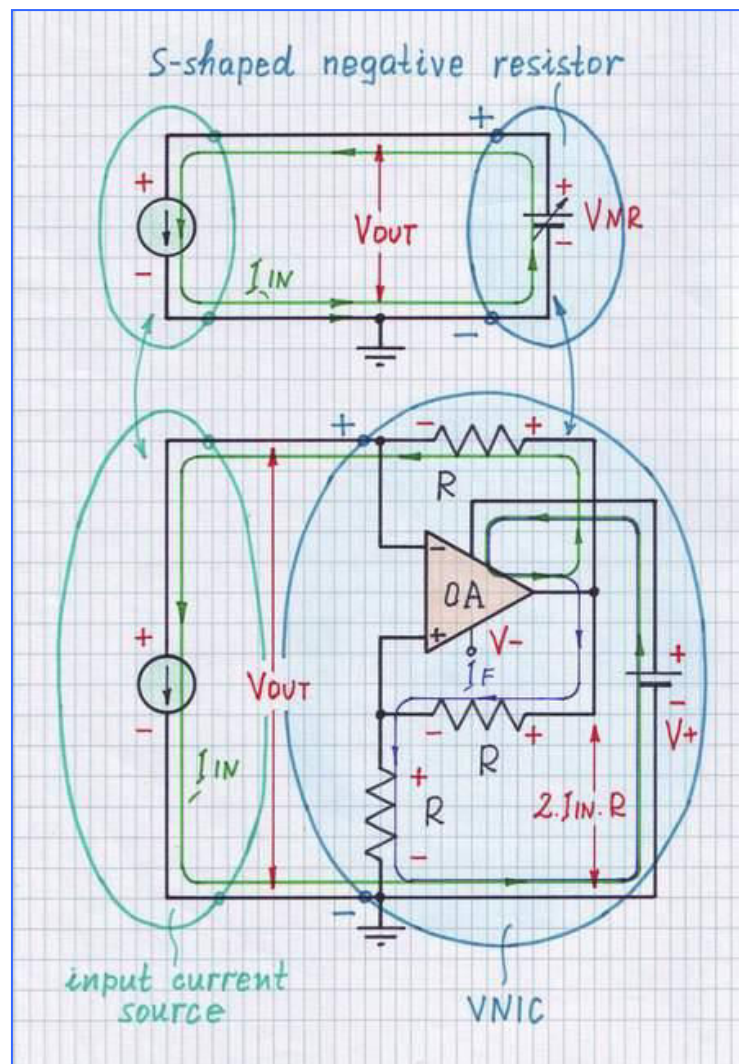


Фиг. 3.20. Схемите с паралелна отрицателна обратна връзка може да се обобщят като се представят съставени от две части: идеален преобразувател *напрежение-ток* (E_1) и идеален преобразувател *ток-напрежение* ($E_2 + V_H$). Те са идеални, защото подпомагащият източник V_H компенсира загубите в елемента E_2 като прибавя допълнително напрежение $V_H = V_{E2}$, равно на напрежителния пад върху елемента E_2 .



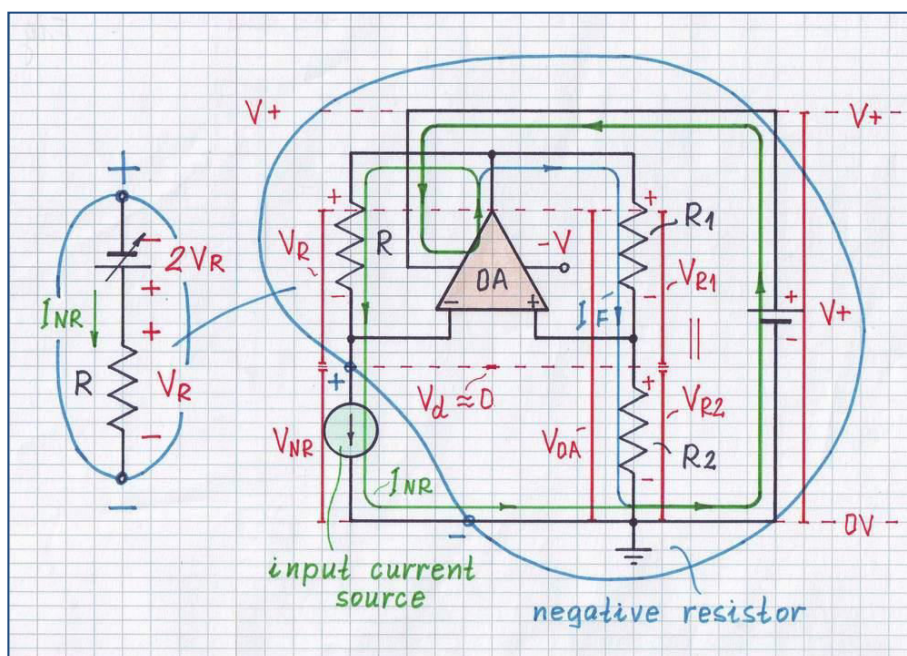
Фиг. 3.21. В конкретните реализации на базовата схема с паралелна отрицателна обратна връзка, един подходящо захранен операционен усилвател играе ролята на подпомагащия източник V_H .

Получаване на отрицателен импеданс чрез инвертиране на напрежението. Реализира се чрез едновременно прилагане на отрицателна и положителна обратна връзка към операционен усилвател с диференциален вход. Входният източник на напрежение трябва да има някакъв импеданс $Z_{int} > 0$ или трябва да бъде свързан чрез някакъв допълнителен импеданс към входа. При тези условия входното напрежение V_i на схемата сменя полярността си с противоположната, защото изходното напрежение надвишава пада на напрежение V_Z върху импеданса ($V_i = V_Z - V_o < 0$). Типично приложение на тази идея е конверторът на отрицателно съпротивление с инверсия на напрежението (VNIC) – фиг. 3.22.



Фиг. 3.22. В схемата на един преобразувател на отрицателно съпротивление от типа VNIC, допълнителното напрежение отясно на резистора R е по-голямо от пада върху него. В резултат на това, напрежението върху изводите на схемата сменя полярността си и входното съпротивление става отрицателно.

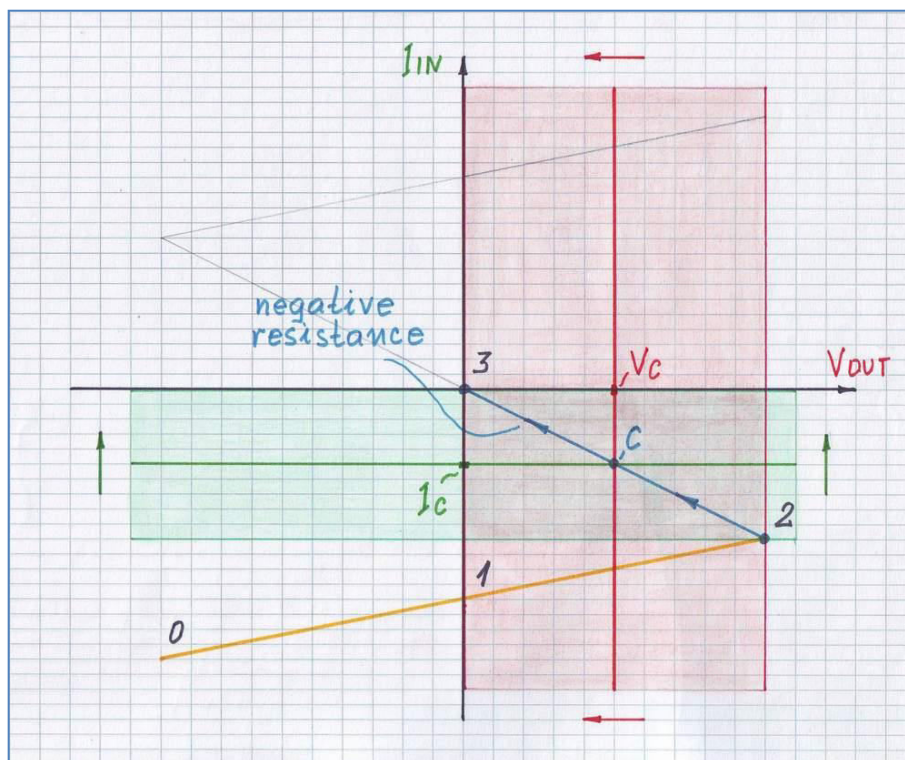
Схемата се държи като резистор с отрицателно съпротивление и S-образна волт-амперна характеристика, който за разлика от един резистор с „положително“ съпротивление генерира, вместо да консумира, напрежение $V_{OUT} = I_{IN} \cdot R$, пропорционално на тока I_{IN} , пропуснат през него. Това напрежение е еквивалентно на напрежителния пад, който би възникнал върху еквивалентния резистор с „положително“ съпротивление R при пропускане на тока I_{IN} . Операционният усилвател сякаш преобразува „положителното“ съпротивление R в отрицателно $-R$, затова схемата е наречена *преобразувател на отрицателно съпротивление*. Тя може да се разглежда като съставена от два елемента: резистор с „положително“ съпротивление R (в горната лява част на фигурата) и неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване 2, който усилва пада на напрежение V_R върху резистора R и го прибавя към него с обратен знак.



Фиг. 3.23. В участъка с отрицателно съпротивление операционният усилвател се държи като един вариращ източник на напрежение $2V_R$ и вътрешно съпротивление R (илюстрирано с напрежителни стълбчета и токови контури).

Усилвателят е изпълнен чрез операционен усилвател и два резистора с еднакво съпротивление $R_1 = R_2 = R$ (фиг. 3.23), образуващи делител на напрежение с коефициент на затихване 0,5. Половината напрежение компенсира пада V_R , другата половина остава и се прибавя към входното напрежение (което обуславя входния ток). Така цялата схема се държи като един подпомагащ динамичен източник на напрежение със стойност V_R , който е свързан последователно и еднопосочно с входния източник на ток. Понеже напрежението върху изводите на схемата има обратна полярност спрямо пада на напрежение върху „положителния“ резистор R , схемата е наречена *преобразувател на отрицателно съпротивление с инверсия на*

напрежението. На фиг. 3.24 е показано как се формира участък с отрицателно съпротивление на волт-амперната характеристика.



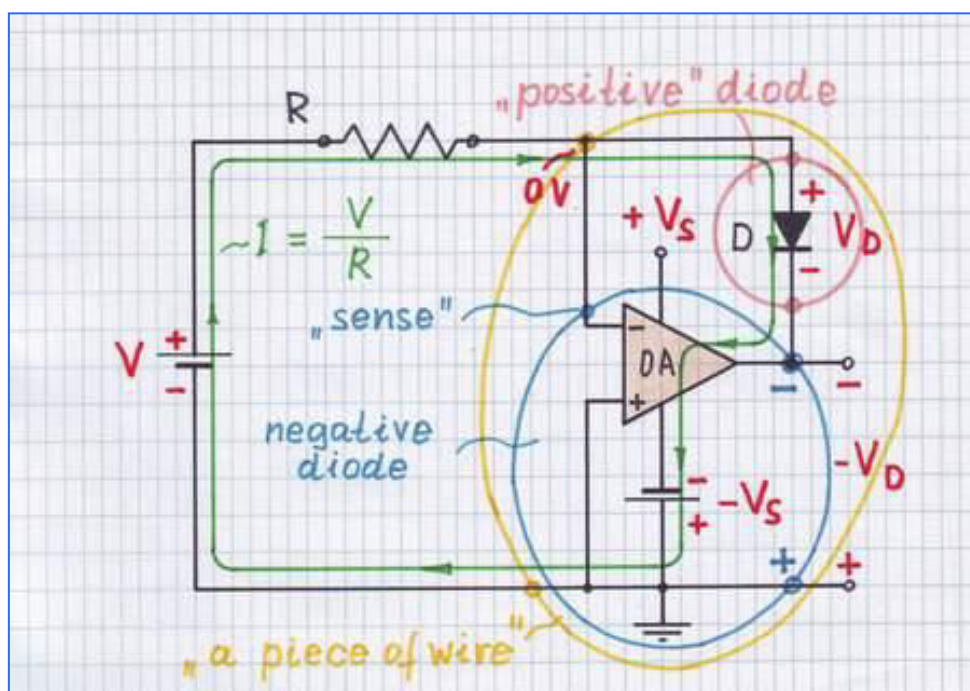
Фиг. 3.24. В участъка с отрицателно съпротивление 2-3, когато характеристиката (в зелено) на входния източник на ток се премества нагоре, операционният усилвател премества енергично характеристиката си (в червено) наляво. В резултат на това пресечната им точка се плъзга нагоре по нова характеристика с отрицателен наклон (в синьо).

В участъка между точки 0 и 2 (в кафяво) операционният усилвател е наситен в положителна посока и се държи като източник на положително напрежение с „положително” вътрешно съпротивление R . Феноменът на отрицателното съпротивление започва да се проявява в точка 2, където входният източник на ток консумира малък ток $|I_{IN}| < V_{SAT+}/2R$ от схемата така, че падът на напрежение V_R е по-малък от половината на напрежението на насищане. Операционният усилвател излиза от насищане и започва да работи в активен режим. Напрежението на инвертиращия му вход е приблизително равно на напрежението на неинвертиращия му вход. Входният ток намалява постепенно и изходното напрежение също намалява. В резултат на това, волт-амперната характеристика на операционния усилвател се премества (успоредна сама на себе си) наляво и пресечната работна точка се плъзга нагоре по новата динамична волт-амперна характеристика на един отрицателен резистор. Това отново не е реална, а пак една изкуствена, въображаема характеристика с отрицателен наклон и преминаваща през началото на координатната система.

За тази схема е интересен фактът, че входното напрежение на схемата има същата полярност като изходното напрежение, въпреки че то е приложено към инвертиращия вход на операционния усилвател. В същото време, напрежението на входния източник има противоположна полярност спрямо горните две напрежения.

4. Обобщаване на постановката на Милър чрез динамизация.

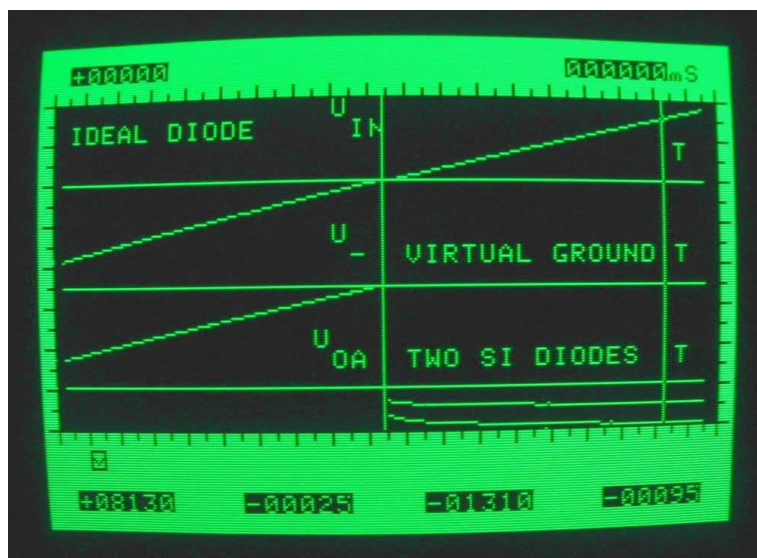
Първоначалният ефект на Милър се е реализирал чрез капацитет, свързан между двата възела. Теоремата на Милър обобщава ефекта на Милър, защото тя предполага, че между възлите е свързан произволен импеданс Z . Предполага се също, че коефициентът K е постоянен. При тези условия изразите по-горе са валидни. Но модифициращите свойства на теоремата на Милър съществуват даже, когато тези изисквания са нарушени и тази постановка може да бъде обобщена още повече чрез динамизация на импеданса и коефициента.



Фиг. 3.25. В схемата на един „идеален” диоден логаритмичен преобразувател операционният усилвател добавя допълнително напрежение V_D , равно на напрежителния пад върху диода D и го „неутрализира” напълно.

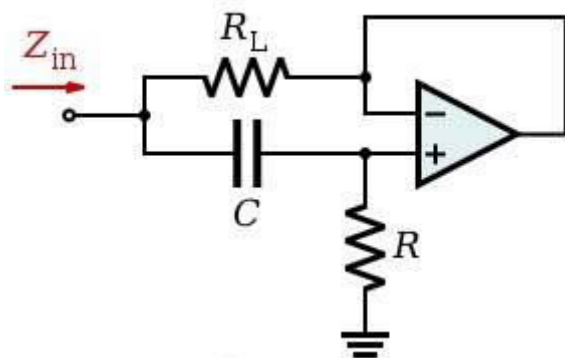
Нелинеен елемент. Освен импеданс, постановката на Милър може да модифицира волт-амперната характеристика на произволен елемент. Схемата на диодния логаритмичен преобразувател (фиг. 3.25) е пример за *нелинейно виртуално нулирано съпротивление*, където логаритмичната характеристика в права посока на един диод е трансформирана във вертикална права линия, припокриваща ординатната ос. Ако изходът на схемата се вземе от инвертиращия

вход на операционния усилвател, получаваме схемата на „идеален диод”. Графичните резултати от изследването ѝ с помощта на система МИКРОЛАБ са показани на фиг. 3.26.

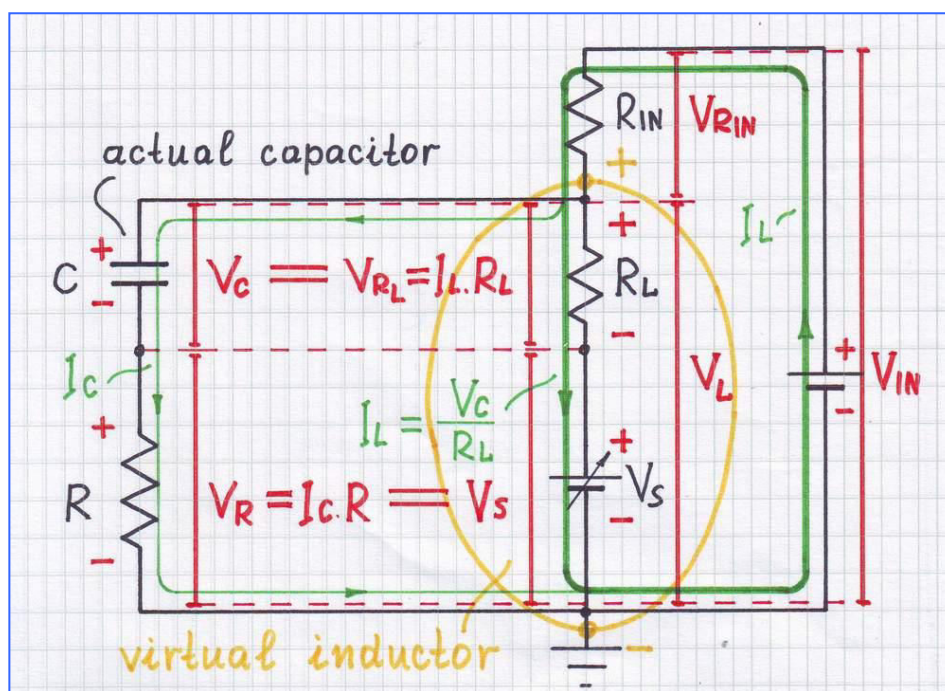


Фиг. 3.26. Графични резултати, получени от изследването на „идеален диод” с помощта на система МИКРОЛАБ: входно напрежение V_{IN} , изходно напрежение на схемата V_- , изходно напрежение на операционния усилвател V_{OA} .

Променлив коефициент. Ако коефициентът K варира, могат да бъдат получени допълнителни екзотични виртуални елементи. Жираторната схема (фиг. 3.27) е пример за такъв виртуален елемент, където едно омично съпротивление е модифицирано така, че то имитира индуктивност, капацитет или „обърнато” съпротивление. В тази екзотична схема един допълнителен източник модифицира волт-амперната характеристика на обикновен омичен резистор и го превръща във виртуална индуктивност (фиг. 3.28) [35].



Фиг. 3.27. Класическа схема на жираторна схема, реализирана с операционен усилвател, която симулира индуктивност.

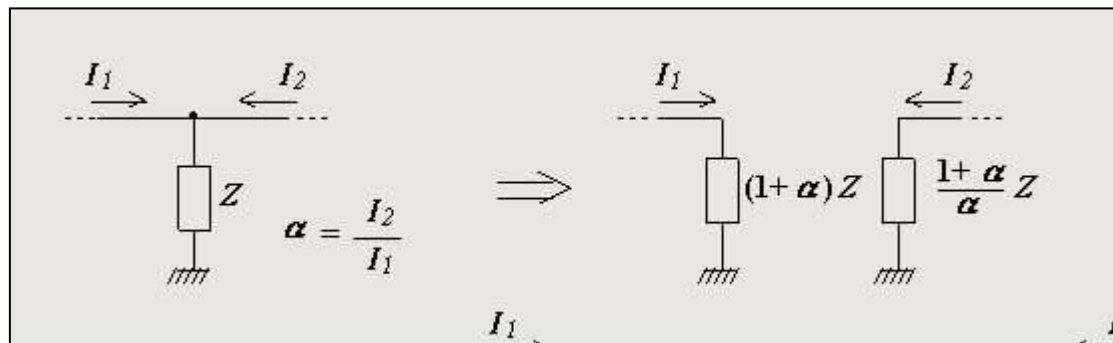


Фиг. 3.28. В еквивалентната схема на жиратор, моделиращ индуктивност, допълнителният източник V_s модифицира волт-амперната характеристика на резистора R_L и го превръща във виртуална индуктивност.

3.1.1.2. МОДИФИЦИРАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ВКЛЮЧВАНЕ НА ДОПЪЛНИТЕЛЕН ПРОПОРЦИОНАЛЕН ИЗТОЧНИК НА ТОК (дуална теорема на Милър)

1. Класическо представяне.

Известна е също и дуална форма на теоремата на Милър (за токовете). Тя гласи, че ако в една линейна схема съществува клон с импеданс Z , свързан към масата и през него текат два тока I_1 and I_2 (фиг. 3.29), този клон може да бъде заместен с два клона, провеждащи токовете, с импеданси $(1 + K)Z$ и $(1 + K)Z/\alpha$, където $K = I_2/I_1$.



Фиг. 3.29. Постановка, илюстрираща преобразуването на импеданс чрез дуалната теорема на Милър за токовете.

Този втори вариант на теоремата е базиран на първия закон на Кирхоф (за токовете) и затова понякога се нарича *теорема на Милър за токовете*. Дуалната теорема на Милър се реализира обикновено чрез система от два източника на напрежение, захранващи “замасения” импеданс Z през „плаващи” импеданси. Комбинациите от източниците на напрежение и принадлежащите им импеданси формират двата източника на ток – главен и спомагателен. Както и при основната теорема на Милър за напреженията, обикновено второто напрежение се генерира от усилвател на напрежение. В зависимост от вида на усилвателя (неинвертиращ, инвертиращ или диференциален) и стойността на коефициента на усиление, входният импеданс на схемата може да бъде *виртуално увеличен, безкрайно голям, намален, нулев или отрицателен*.

2. Разкриване на базовата идея на дуалната теорема на Милър чрез функционален анализ.

Дуалната теорема на Милър изразява факта, че *включването на втори източник с пропорционален ток $I_2 = KI_1$ паралелно на главния входен източник на ток I_1 и импедансния елемент променя тока, протичащ през него, напрежението и съответно схемния импеданс, гледан от страната на входния източник*. В зависимост от посоката, I_2 действа като спомагателен източник на ток, подпомагащ или възпрепятстващ основния входен източник на

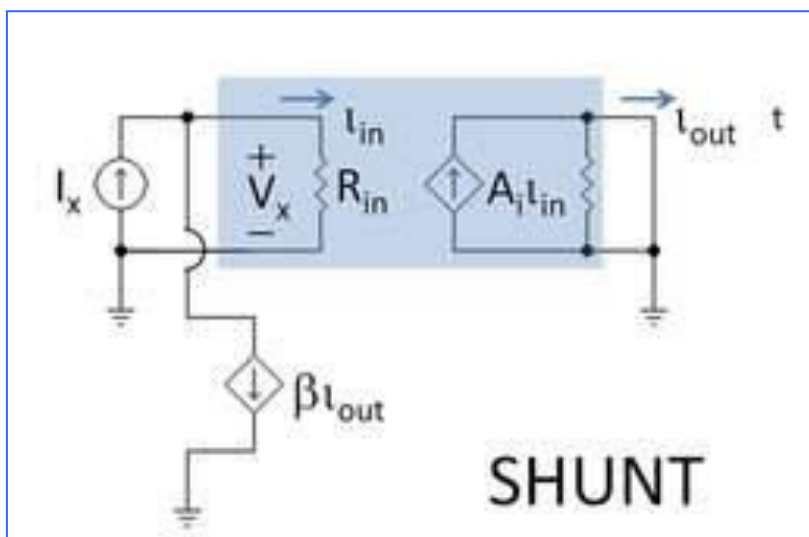
ток в стремежа му да създаде напрежителен пад върху импедансия елемент. Комбинацията от оригиналния елемент и втория източник на ток може да бъде разглеждана като нов виртуален елемент с динамично модифициран импеданс.

3. Нова интерпретация на дуалната теорема на Милър.

Аналогично на основната теорема на Милър за напреженията, в настоящата работа идеята на дуалната теорема на Милър за токовете е разширена до принцип за модифициране на схемните параметри. Той обяснява фундаментални схемни феномени и подпомага разбирането и конструирането на множество популярни базови схеми. Предложени са общо шест правила за модифициране на схемни параметри – първите три са за виртуално намаляване, а останалите три - за виртуално увеличаване на импеданс.

А. ВИРТУАЛНО НАМАЛЯВАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ИЗВАЖДАНЕ НА ПРОПОРЦИОНАЛЕН ТОК

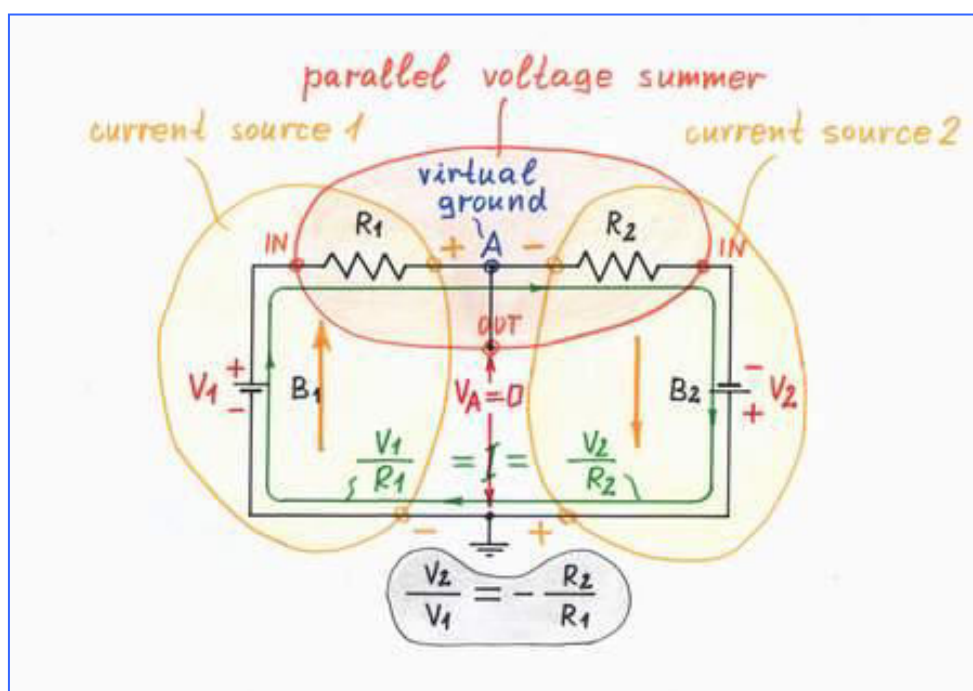
Ако допълнителният източник на ток се включи паралелно и противоположно на основния входен източник на ток (фиг. 3.30), неговият ток се изважда от входния (образно казано, допълнителният източник „пречи” на входния). В резултат на това, ефективното напрежение, приложено върху елемента, токът протичащ през него и входният импеданс, намаляват. С тази постановка могат да бъдат обяснени широк клас от съществуващи схеми и може да се изобретят нови схеми с намален, нулев и отрицателен импеданс.



Фиг. 3.30. Пропускането на допълнителен ток с противоположна посока на входния ток увеличава виртуално входния импеданс на схемата.

Умерено намаляване на импеданс. Може да се реализира чрез транзисторен източник на ток, свързан в обратна посока (спрямо общия товар) на основния входен източник на ток.

Нулиране на импеданс. Реализира се чрез идеален източник на ток, свързан в обратна посока на основния входен източник на ток. Типично приложение на тази идея е инвертиращият усилвател на напрежение, реализиран с операционен усилвател. В тази базова схема, от една страна, входният източник на напрежение и принадлежащият му резистор R_1 образуват източник на влизащ в точката А ток със стойност V_1/R_1 (фиг. 3.31). От друга страна, изходният източник на напрежение (подходящо захраненият операционен усилвател) и принадлежащият му резистор R_2 формират втори, допълнителен източник на излизащ от точката А ток със същата стойност V_2/R_2 , който се вади от входния ток. В резултат на това, напрежението на инвертиращия вход на операционния усилвател (между двата резистора) става равно на нула и в тази точка се появява *виртуална маса*. Входното съпротивление на схемата е почти равно на нула и представлява късо съединение за двата източника на ток (всяка от схемите представлява късо съединение за другата). Следователно, те се държат като почти идеални източници на ток.



Фиг. 3.31. Един инвертиращ усилвател може да се представи чрез еквивалентна схема от два източника на ток, прокарващи равни токове с противоположна посока в сумиращата точка А на входа на операционния усилвател. В резултат на това, напрежението в тази точка е равно на нула и тя се държи като виртуална маса.

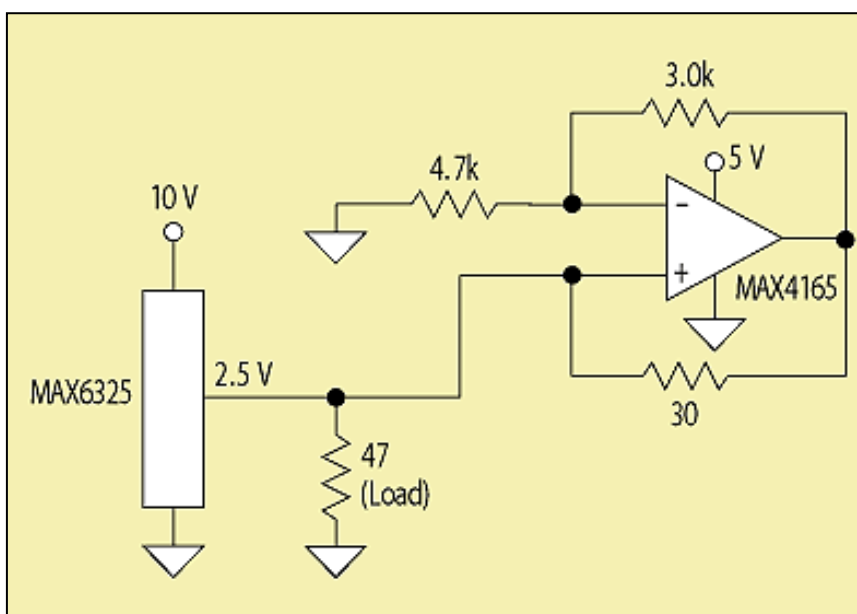
Получаване на отрицателен импеданс чрез инвертиране на напрежението. Може да се реализира чрез едновременно прилагане на отрицателна и положителна обратна връзка към операционен усилвател с диференциален вход.

Б. ВИРТУАЛНО УВЕЛИЧАВАНЕ НА ИМПЕДАНС ЧРЕЗ ПРИБАВЯНЕ НА ПРОПОРЦИОНАЛЕН ТОК

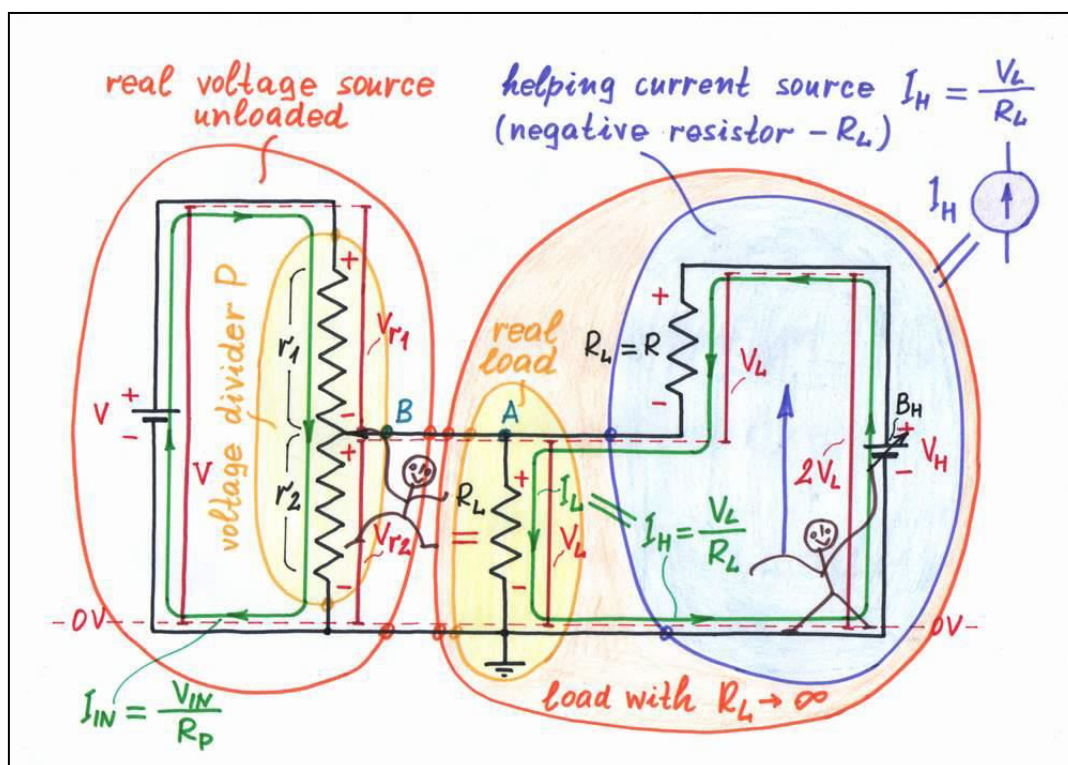
Ако допълнителният източник на ток се включи паралелно и еднопосочно с основния входен източник на ток, неговият ток се прибавя към входния (образно казано, допълнителният източник „подпомага” входния). В резултат на това, ефективното напрежение, приложено върху елемента и токът, протичащ през него, се увеличават, което води до виртуално увеличаване на входния импеданс. С тази постановка могат да бъдат обяснени широк клас от съществуващи схеми и може да се изобретят нови схеми с увеличен, безкрайно голям и отрицателен импеданс.

Умерено увеличаване на импеданс. Може да се реализира чрез допълнителен транзисторен източник на ток, свързан еднопосочно на основния входен източник на ток. Токът на допълнителния източник подпомага частично входния източник на ток, което води до умерено виртуално увеличаване на входния импеданс.

Получаване на безкрайно голям импеданс. В този случай допълнителният източник дава целия ток за захранване на елемента и по този начин заменя напълно основния входен източник на ток. В резултат на това, импедансът на елемента се увеличава виртуално многократно. Тази идея може да се използва за елиминиране на вредното влияние на товара (фиг. 3.32), включен към схеми със сравнително високо изходно съпротивление [36, 37 и 38].



Фиг. 3.32. „Неутрализатор” на резистивен товар (класическа схема).



Фиг. 3.33. Идеята на един „неутрализатор“ на резистивен товар, представена с еквивалентна електрическа схема: помощният източник V_H дава целия товарен ток I_L и така заменя напълно входния източник V .

„НЕУТРАЛИЗАТОР“ НА РЕЗИСТИВЕН ТОВАР. Така например, на фиг. 3.33 е показан един делител на напрежение с включен резистивен товар на изхода, който би трябвало да консумира товарен ток I_L и да намалява изходното напрежение на делителя. За да се компенсира вредното му влияние, е включен втори източник на ток, реализиран с източник на напрежение и резистор R . Този източник на ток действа като резистор с отрицателно съпротивление $-R_L$, който „неутрализира“ товара с „положително“ съпротивление R_L . Фактически той, а не делителят на напрежение осигурява целия ток, необходим на товара. Образно казано, делителят на напрежение „има илюзията“, че няма включен товар към изхода му и той работи на празен ход.

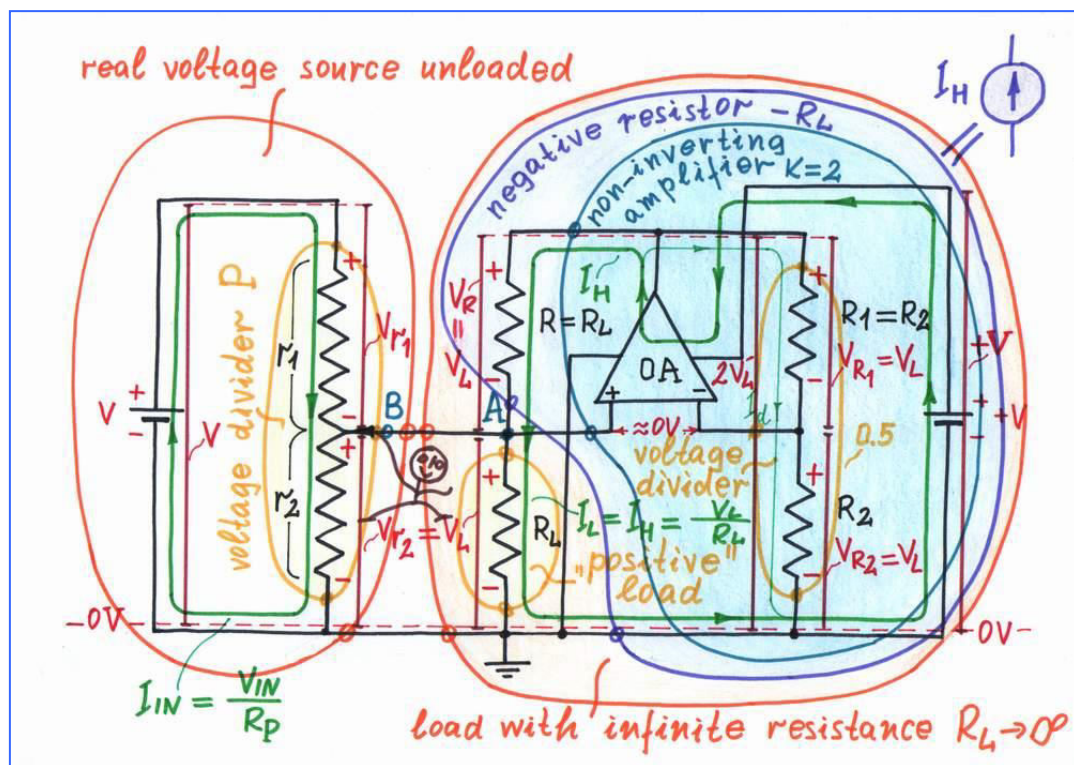
Едно функционално обяснение на тази схемна реализация е следното. Ако към един резистор с положително съпротивление R_L е приложено напрежение V_L , той ще консумира товарен ток $I_L = V_L/R_L$. Обратно, ако се приложи същото напрежение върху един резистор R със същото по стойност, но отрицателно съпротивление, той трябва да генерира същия ток $I_H = V_L/R_L = I_L$. Това означава, че десния край на резистора R (първоначално свързан към масата) трябва да се „повдигне“ с напрежението V_L спрямо левия му край, който е свързан с товара. За тази цел се свързва компенсиращ източник на напрежение V_H последователно на „положителния“ резистор $R = R_L$. В резултат на това през товара протича ток:

3.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ С ДОПЪЛНИТЕЛЕН ИЗТОЧНИК.

$$I_H = (V_H - V_L)/R = (2V_L - V_L)/R_L = V_L/R_L = I_L,$$

еквивалентен на товарния ток I_L . Така целият ток I_L се осигурява само от подпомагащия източник на ток (отрицателният резистор $-R_L$) вместо от входния реален източник на напрежение. Товарът не консумира никаква енергия от входния източник, понеже е захранен изцяло от подпомагащия източник. Образно казано, товарът (pull-down resistor) „издърпва“ точката А надолу към масата, докато резисторът R (pull-up resistor) я „издърпва“ нагоре към захранващия източник V_H . Като резултат от това „разпъване“, точката А е в състояние на „безтегловност“ и следва лесно промените на точка В. По „моста“, свързващ точките А и В не тече ток понеже цялата дясна част на схемата (R_L , R и V_H) се държи като товар с безкрайно голямо съпротивление. Всъщност това е добре познатият феномен, наречен *буутстрапинг* (bootstrapping).

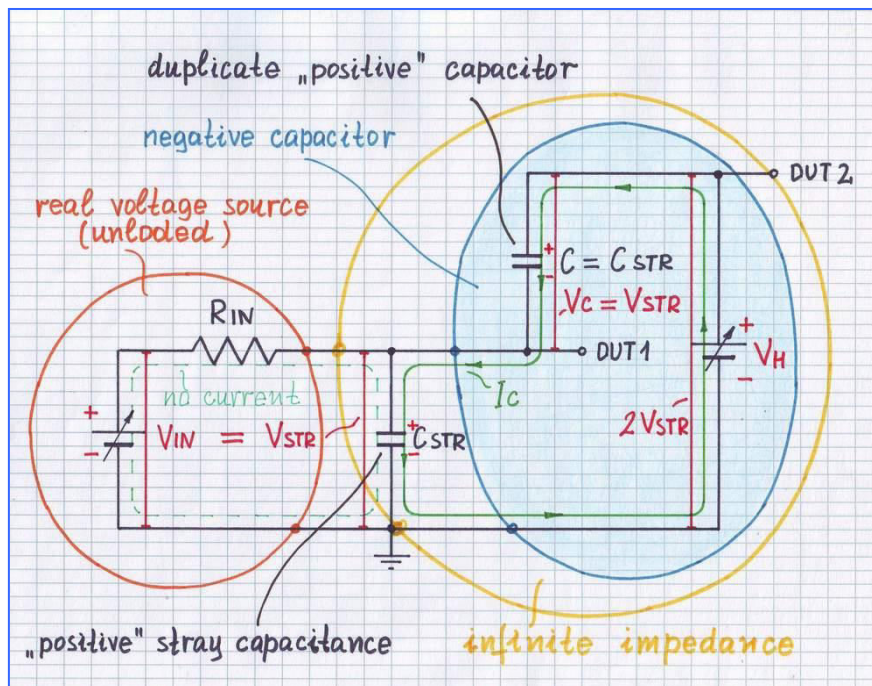
Популярна реализация на тази екзотична идея може да се направи чрез конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока INIC (фиг. 3.34).



Фиг. 3.34. „Неутрализатор“ на товар, направен чрез конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC).

„НЕУТРАЛИЗАТОР“ НА ПАРАЗИТЕН КАПАЦИТЕТ. По аналогичен начин, чрез виртуално увеличаване на импеданса могат да бъдат „неутрализирани“ и паразитните капацитети в електронните схеми (чрез включване на „отрицателен“ капацитет паралелно на „положителния“

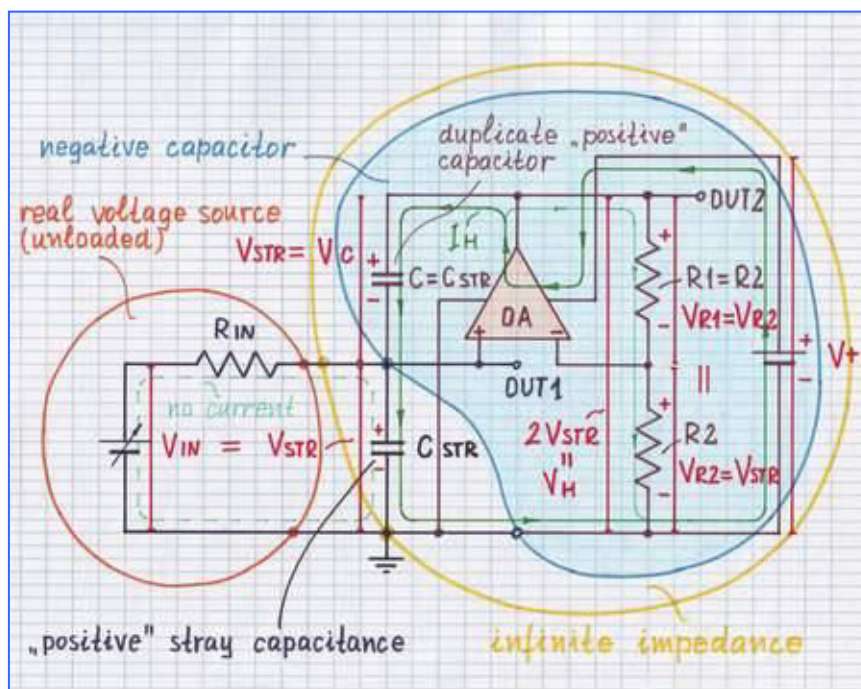
паразитен капацитет). Идеята на схемата е разкрита на функционално ниво чрез еквивалентна електрическа схема (фиг. 3.35).



Фиг. 3.35. Идеята на един „неутрализатор“ на паразитен капацитет, представена с еквивалентна електрическа схема: помощният източник V_H дава целия ток за зареждане на паразитния капацитет C_{STR} и така заменя напълно входния източник V_{IN} .

Докато един „положителен“ кондензатор консумира енергия от входния източник (т.е., той функционира като товар), „отрицателният“ кондензатор прави точно обратното – той вкарва енергия в схемата (т.е., функционира като източник). По-конкретно, това означава, че докато един последователно свързан „положителен“ кондензатор изважда пад на напрежение от входния източник, то токово-управляваният „отрицателен“ кондензатор добавя напрежение към входното напрежение (той е източник на напрежение). Също така, докато един паралелно свързан „положителен“ кондензатор поглъща ток, то напреженово-управляваният „отрицателен“ кондензатор вкарва ток (той е източник на ток).

За да компенсира напълно смущаващия ток през кондензатора, „отрицателният“ кондензатор трябва да произведе ток със същата сила и зависещ по същия начин във времето. В резултат на това, паразитният капацитет няма да консумира никакъв ток от входния източник, защото „отрицателният“ кондензатор ще осигурява целия ток, необходим за зареждането на паразитния капацитет.



Фиг. 3.36. „Неутрализатор” на паразитен капацитет, направен чрез конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC).

И тази екзотична идея може да се реализира чрез конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC) – фиг. 3.36. Схемата използва същия схематически трик за да преобразува „положителния” в „отрицателен” капацитет. За целта, един подпомагащ източник на напрежение $V_H = 2 \cdot V_{STR}$ (неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване $K = 2$) е свързан последователно на „положителния” кондензатор C със същия капацитет като паразитния капацитет C_{STR} . Източникът на напрежение инжектира ток I_H със същата сила като тока I_C , протичащ през паразитния капацитет. По този начин, целият ток I_C се осигурява само от подпомагащия източник вместо от входния и паразитният капацитет не консумира енергия от входния източник, понеже е захранван изцяло от подпомагащия източник. Така входният източник на напрежение работи при идеални условия (на празен ход, ненатоварен с паразитния капацитивен товар). В резултат на това, напрежението V_{STR} е равно на входното.

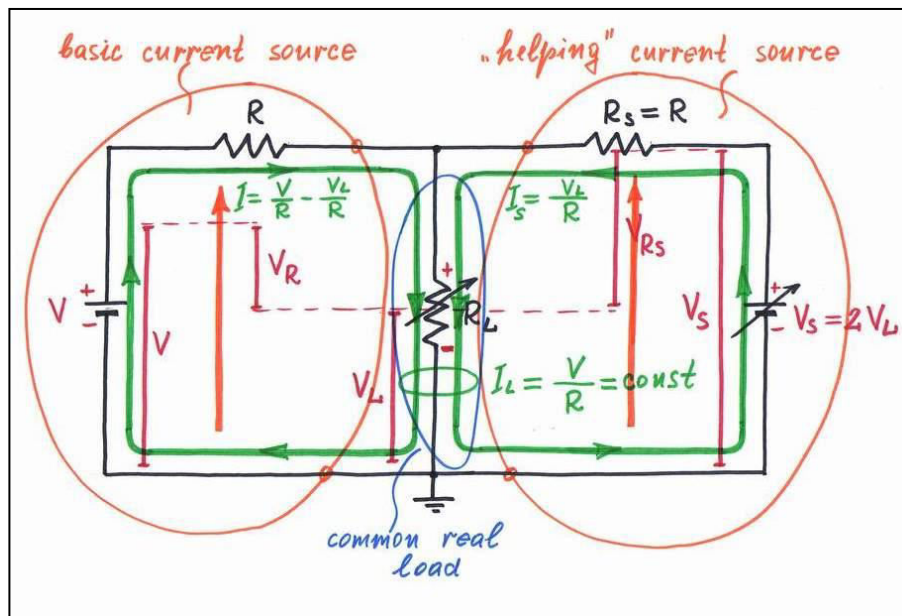
ИЗТОЧНИК НА ТОК НА ХАУЛЕНД. Идеята за виртуално увеличаване на импеданс стои в основата на популярната схема на източник на ток на Хауленд [39]. Тази оригинална схема може да се представи функционално чрез електрическа еквивалентна схема, съставена от два източника на ток, включени паралелно към общ товар (фиг. 3.37) Входното напрежение V и резисторът R формират елементарен източник на ток. Той пропуска ток:

$$I = (V - V_L)/R = V/R - V_L/R,$$

3.1.1. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ С ДОПЪЛНИТЕЛЕН ИЗТОЧНИК.

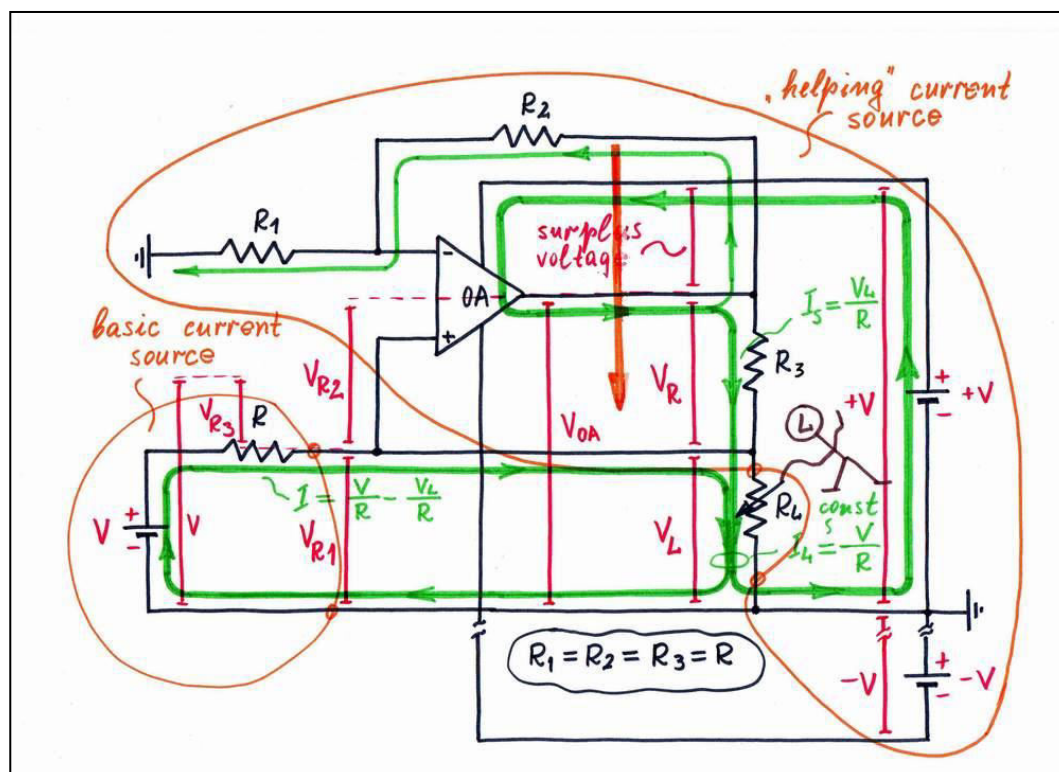
от ляво към товара R_L , който се различава от идеалния резултат ($I = V/R$) със стойността V_L/R . Очевидно, тази грешка може да се компенсира, като се добави ток със същата стойност. Това означава да се „инжектира“ допълнителен „подпомагащ“ ток $I_H = V_L/R$, пропорционален на напрежението върху товара. За целта, с помощта на резисторите R_1 , R_2 и операционният усилвател ОА, е изграден неинвертиращ усилвател (фиг. 3.38), който заедно с резистора R_3 формира подпомагащия източник на ток. Той генерира ток $I_s = V_L/R$, който протича от дясно към товара R_L . В резултат на това, през товара протича сумарен константен ток:

$$I_L = I + I_s = V/R - V_L/R + V_L/R = V/R_L.$$



Фиг. 3.37. Идеята на източника на ток на Хауленд, представена с еквивалентна електрическа схема: помощният източник на ток (V_s/R_s) подпомага несвършения входен източник на ток (V/R), като пропуска допълнителен ток $I_s = V_L/R$ през товара.

Фактически, това е схемата на един конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC), изпълняващ функцията на управляван с напрежение N-тип отрицателен резистор. С отрицателното си съпротивление $-R$ той неутрализира положителното съпротивление R на входния източник. В резултат на това се получава източник на ток с безкрайно голямо вътрешно съпротивление. За сравнение, в един неутрализатор на товар същата схема на преобразувател INIC неутрализира положителното съпротивление на товара като му осигурява целия необходим ток и в резултат на това входният източник на напрежение работи на празен ход.



Фиг. 3.38. Източник на ток на Хауленд, направен чрез конвертор на отрицателно съпротивление с инвертиране на тока (INIC).

3.1.2. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ЕЛЕКТРОННИТЕ ЕЛЕМЕНТИ ЧРЕЗ ДИНАМИЗАЦИЯ НА ИМПЕДАНСА

В предишната глава разгледахме начини за създаване на *виртуални електронни елементи*, основани на теоремата на Милър, чрез последователно или паралелно включване на допълнителни пропорционални източници на напрежение или ток. В настоящата глава, с помощта на евристични средства ще разкрием идеята на още един начин за модифициране на характеристиките на електронните елементи – чрез *динамизация на съпротивлението* (в общия случай – на импеданса). Това ще направим като първо проследим метаморфозата на един обикновен омичен резистор в *динамичен резистор*: първо - *виртуално намален*, след това – *виртуално нулиран* и накрая - *S-тип отрицателен диференциален резистор* (ОДР). След това ще превърнем омичния резистор във *виртуално увеличен, безкрайно голям* и *N-тип отрицателен диференциален резистор*. Еволюцията на съпротивлението от омично към отрицателно ще визуализираме графично, като изчертаваме последователно, стъпка по стъпка, волт-амперната характеристика на елемента чрез отделни прави линии (отсечково-линейна апроксимация на реалната характеристика).

3.1.2.1. ВИРТУАЛНО НАМАЛЯВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕ

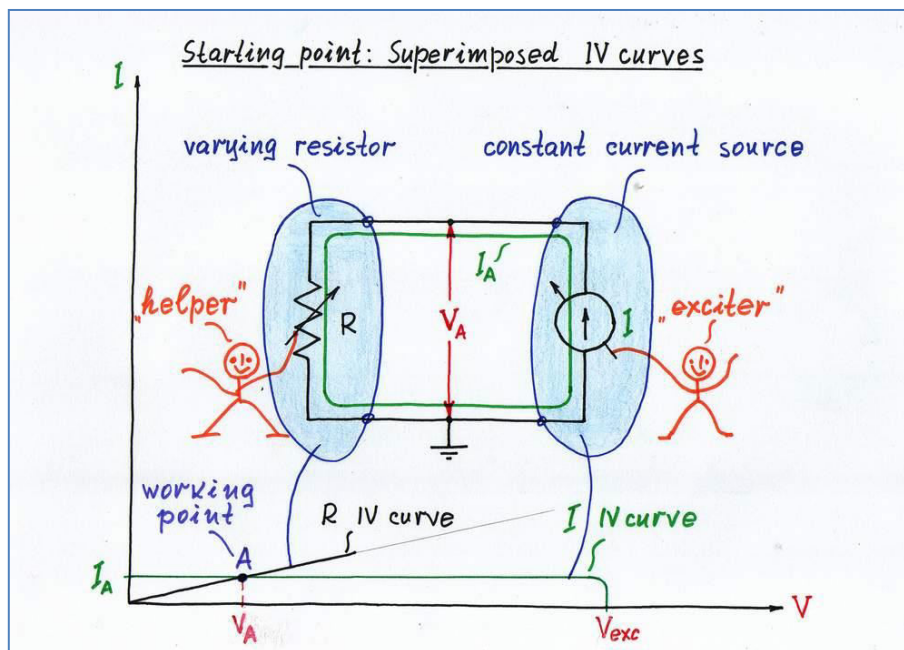
1. Опитна постановка за емулиране на ОДР.

Най-добрият начин да разберем идеите, на които са базирани такива екзотични електронни елементи и схеми, е да се поставим на тяхно място и да започнем да изпълняваме функциите им (т.е., да използваме *емпатия*). И така, какво всъщност прави един динамичен резистор (например, един S-тип отрицателен диференциален резистор)? Той просто променя текущото си съпротивление по определен начин в зависимост от приложеното напрежение или ток. Тогава можем лесно да го *емулираме* с помощта на един променлив резистор (реостат), на който движим плъзгача по определен начин (фиг. 3.39).

Ние можем да наблюдаваме много примери (анalogии) на тази постановка в нашето ежедневие, когато срещаме някаква съпротива при реализирането на целите си. Добра илюстрация на това може да бъде една „водопроводна” аналогия, където някой регулира чрез главния спирателен кран дебита или налягането на водата в тръбопровода, а друг променя съпротивлението чрез втори кран.

Действието на тази възможно най-проста електрическа верига (източник, свързан към товар) можем да представим графично, ако отчетем факта, че напрежението върху двата елемента е едно и също, и токът, протичащ през тях, е един и същ. За целта трябва само да наложим двете характеристики една върху друга в една обща координатна система. Волт-амперната характеристика на променливия резистор е права линия, преминаваща през началото

на координатната система и с наклон, зависещ от моментното му съпротивление. Волт-амперната характеристика на входния източник на ток е една хоризонтална линия, изместена вертикално на разстояние от абсцисата, а на входния източник на напрежение - вертикална линия, изместена хоризонтално от ординатата. Пресечната точка А (т.е., работната точка) представя моментните стойности на тока I_A и напрежението V_A .



Фиг. 3.39. Изходна постановка за „ръчно” емулиране на динамично „намаляващо” съпротивление.

За да могат да се наблюдават участъците с отрицателно съпротивление на волт-амперните характеристики на отрицателните резистори, те трябва да работят в линеен режим. За целта, S-отрицателните диференциални резистори трябва да са захранени от източник на ток, а N-резисторите - от източник на напрежение. В противен случай, те ще работят в по-необичайния двустабилен (тригерен) режим.

2. Високо начално омично съпротивление.

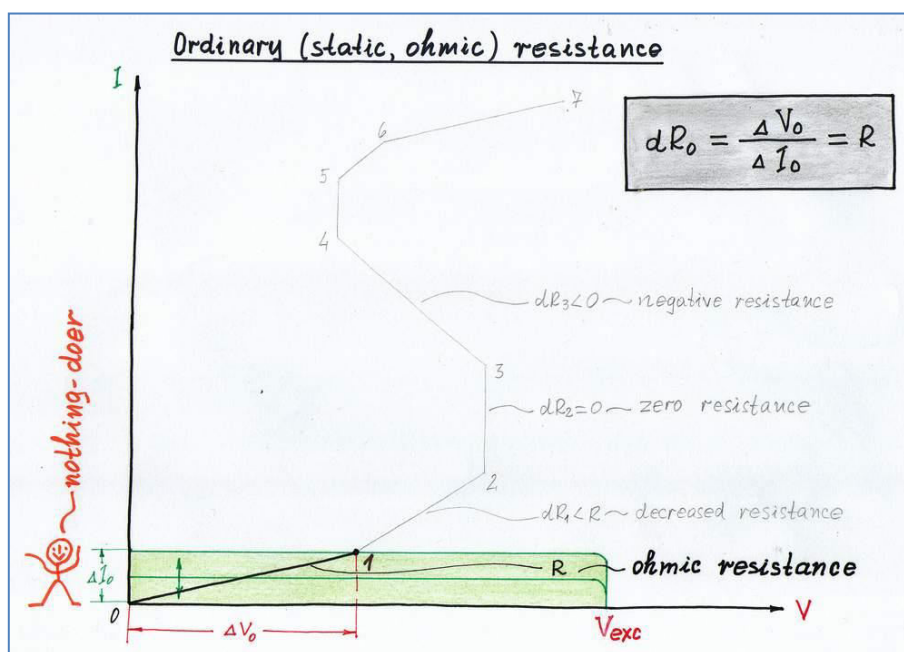
В живота, когато прилагаме някаква величина от вида „поток” и срещаме постоянна, но голяма по стойност съпротива, получената величина от вида „налягане” е пропорционална на нашите усилия. Така например, във „водопроводната” аналогия, когато сме отворили леко крана, а някой плавно увеличава чрез главния спирателен кран дебита на водата в тръбопровода, налягането на водата в тръбопровода започва да расте пропорционално на потока (това изразява закона на Ом в хидравликата).

Тази житейска ситуация можем да пренесем в опитната постановка от фиг. 3.39. В началото установяваме плъзгача на реостата в крайно положение с най-голямо съпротивление.

3.1.2. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧРЕЗ ДИНАМИЗАЦИЯ НА ИМПЕДАНСА

Когато входният ток I_{IN} започне да нараства линейно, върху резистора се появява пад на напрежение V_{OUT} и започва да нараства линейно. Съгласно закона на Ом, той е пропорционален на тока, протичащ през резистора - $V_{OUT} = R \cdot I_{IN}$. Напрежението зависи само от тока и изразът представлява функция на една променлива.

В графичното представяне (фиг. 3.40), когато токът на входния източник се изменя, неговата волт-амперна характеристика започва да се мести във вертикална посока, като остава успоредна сама на себе си. Работната точка А се плъзга по волт-амперната характеристика на омичния резистор в участъка от точка 0 до точка 1, който представлява част от права линия. Наклонът на волт-амперната характеристика на резистора представя графично стойността на неговото съпротивление – то е едно статично, неизменно по стойност и равно на диференциалното съпротивление $dR_0 = R$, защото не зависи от положението на работната точка А.

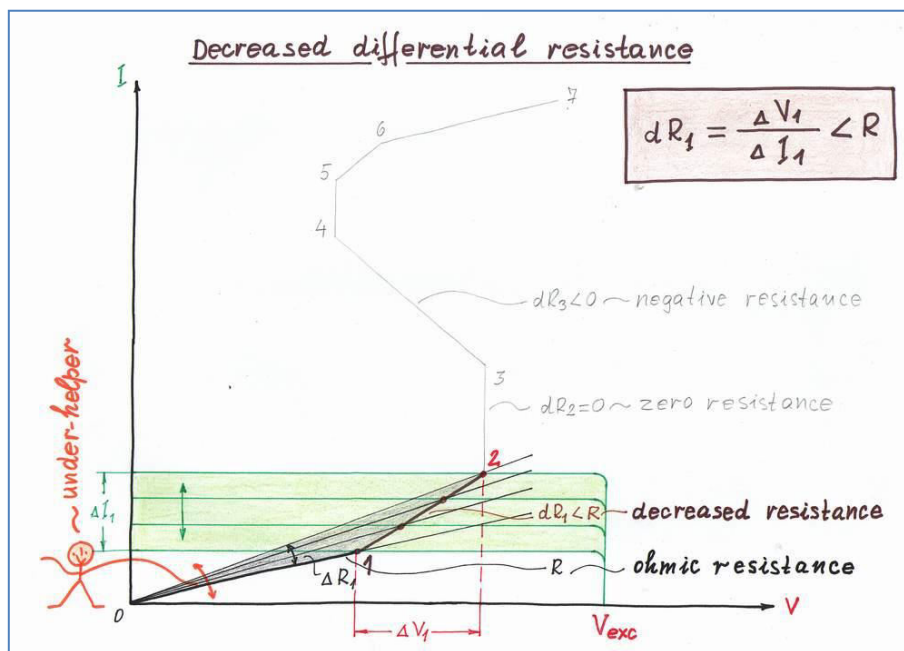


Фиг. 3.40. В участъка 0-1 се наблюдава съпротивление с голяма, но постоянна стойност (омично съпротивление).

3. Виртуално намалено съпротивление.

Но има редица житейски ситуации, в които степента на съпротивата, която изпитваме, се променя динамично. В тези случаи този, който ни се противопоставя, има променливо поведение и започва да намалява (незабелязано за самите нас) първоначалната си съпротива. В резултат на това, ние имаме илюзията, че силата на съпротивата е намаляла; съответно се е намалило и „налягането”. Така например, ако във „водопроводната” аналогия започнем да отваряме постепенно крана, когато дебитът на водния поток расте, налягането на водата в

тръбопровода ще нараства по-бавно и това ще създава илюзията, че съпротивлението е намаляло.



Фиг. 3.41. Виртуално намаляване на съпротивление в участъка 1-2.

Идеята на такава една „динамизация“ можем да приложим за да намалим виртуално съпротивлението R в постановката от фиг. 3.39. За целта, когато достигнем точка 1 (фиг. 3.41), започваме да движим леко плъзгача на реостата за да намаляваме постепенно съпротивлението му. Така то се променя едновременно и пропорционално на входния ток, като изпълнява ролята на втора входна променлива в предавателната функция ($V_{OUT} = I_{IN} \cdot R$). В резултат на това, напрежението започва да зависи както от напрежението, така и от съпротивлението, и законът на Ом става функция на две променливи - $V_{OUT} = I_{IN1} \cdot R_{IN2}$. Ние обаче продължаваме да я разглеждаме като функция на една променлива и затова оставаме с впечатлението, че съпротивлението се е намалило. Това е така, защото когато входният ток I_{IN1} расте, съпротивлението R_{IN2} намалява слабо и тяхното произведение V_{OUT} се увеличава по-бавно, отколкото в случая на постоянно съпротивление. Така ние имаме илюзията, че съпротивлението R се е намалило постоянно, но фактически то намалява непрекъснато и ние виждаме едно ново, по-малко по стойност динамично (диференциално) съпротивление $dR_1 < R$. „Статичното“ съпротивление R сякаш е преобразувано в едно по-малко по стойност диференциално съпротивление dR . Такава характеристика имат например по-некачествените ценерови и обикновени диоди.

Представено графично (фиг. 3.41), когато токът на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 1 до точка 2, неговата волт-амперна характеристика продължава

да се мести във вертикална посока като остава успоредна на себе си. Но в същото време ние започваме да намаляваме постепенно съпротивлението и затова волт-амперната характеристика на омичния резистор започва да се върти около началото на координатната система в посока, обратна на часовниковата стрелка. В резултат на това, работната точка А се плъзга по нова, по-стръмна волт-амперна характеристика, която представя новото динамично съпротивление $dR < R$. Като цяло, тази пречупена характеристика представя нелинейно съпротивление, но участъкът 1-2 представлява права линия, която наподобява обикновеното омично съпротивление. Виждайки само тази част от характеристиката, ние имаме илюзията, че изследваме омичен резистор. Но ако обхванем с поглед цялата характеристика, ще забележим, че продължението на линията не преминава през началото на координатната система.

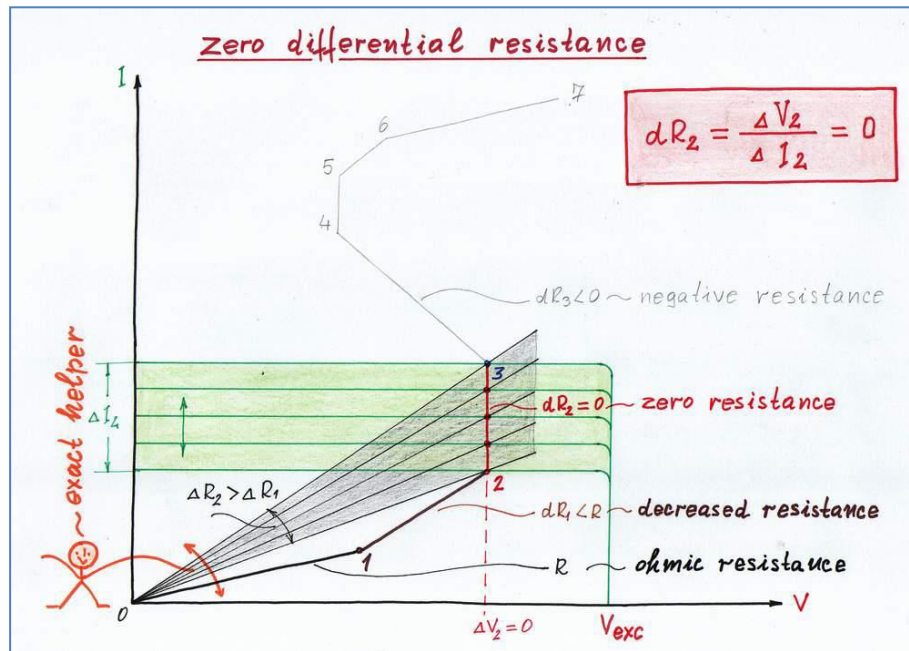
4. Виртуално нулирано съпротивление.

Идеята на динамизацията може да бъде развита като степента на съпротивата, която изпитваме, е намалена динамично до такава степен, че на практика не изпитваме никаква съпротива, когато осъществяваме целите си. Резултатът е поразителен - ние имаме илюзията, че съпротивата е изчезнала въобще и величината от типа „налягане” стои неизменна. Тази ситуация можем да възпроизведем във „водопроводната” аналогия, ако започнем да отваряме крана със същата скорост, с каквато се променя и входният воден поток. Така потокът и съпротивлението се променят еднакво, но в различни посоки. Резултатът е същият - когато дебитът на водния поток расте, налягането на водата в тръбопровода въобще не се променя и това ни създава илюзията, че няма никакво съпротивление (то е нулево). Това обаче е само по отношение на промяната.

Тази идея можем да приложим в електрониката за да нулираме виртуално съпротивлението R в постановката от фиг. 3.39. За целта, когато достигнем точка 2 (фиг. 3.42), започваме да движим интензивно плъзгача на реостата за да намаляваме значително съпротивлението му. По този начин, в закона на Ом ($V_{OUT} = I_{IN1} \cdot R_{IN2}$) входният ток I_{IN1} се увеличава, а съпротивлението R_{IN2} намалява със същата скорост, в резултат на което произведението им V_{OUT} не се променя. Така ние имаме чувството, че въобще няма съпротивление и входният източник на ток е даден „накъсо”. На практика, по този начин сме направили един *напреженово-стабилизиращ двуполусник* (стабилизатор на напрежение). Всички видове диоди (обикновени, светодиоди, ценерови диоди и др.), варистори и редица схеми с паралелна отрицателна обратна връзка по напрежение (наричани *активни диоди* и *активни ценерови диоди*) действат по този начин.

В графичното представяне (фиг. 3.42), когато токът на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 2 до точка 3, неговата волт-амперна характеристика продължава да се мести във вертикална посока като остава успоредна на себе си. Но в същото време ние

започваме да намаляваме значително съпротивлението и затова волт-амперната характеристика на омичния резистор се върти енергично около началото на координатната система в посока, обратна на часовниковата стрелка. В резултат на това, работната точка А се плъзга нагоре от точка 2 до точка 3 по новата вертикална волт-амперна характеристика, която представя нулевото динамично съпротивление $dR_2 = 0$.



Фиг. 3.42. Виртуално нулиране на съпротивление в участъка 2-3

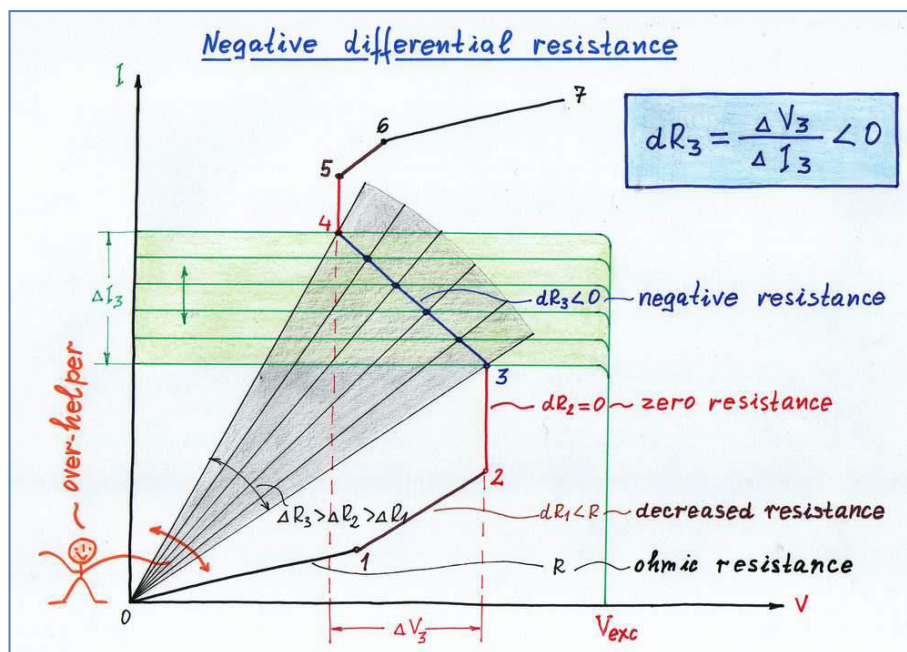
5. Отрицателно диференциално съпротивление от S-тип.

Накрая можем да развием неимоверно идеята на динамизацията, така че степента на съпротивата, която изпитваме, да бъде намалена многократно повече от необходимото. Резултатът е съвсем неочакван - ние увеличаваме входната величина от типа „поток”, а „налягането” намалява! Във „водопроводната” аналогия, когато някой започне да отваря главния спирателен кран, ние започваме да отваряме нашия кран с още по-голяма скорост от тази на входния воден поток. Резултатът е изненадващ - когато дебитът на водния поток расте, налягането на водата в тръбопровода спада, вместо да расте!

Ако приложим тази идея в електрониката, ще успеем да превърнем „положителното“ съпротивление R от постановката на фиг. 3.39 в едно „*намаляващо*“ *отрицателно диференциално съпротивление*. Фактически, това означава да накараме напреженово-стабилизиращият двуполусник от предишната стъпка да се „престарава“, когато променя съпротивлението си. За целта, когато достигнем точка 3 (фиг. 3.43), започваме да движим изключително интензивно плъзгача на реостата за да намаляваме енергично съпротивлението му. Така, ситуацията със закона на Ом ($V_{OUT} = I_{IN1} \cdot R_{IN2}$) става изключително интересна -

входният ток I_{IN1} се увеличава, но съпротивлението R_{IN2} намалява по-бързо от него и в резултат на това производението им V_{OUT} намалява също. Това е феноменът на отрицателното съпротивление – ние увеличаваме входната променлива (токът), но изходната (напрежението) намалява.

Образно казано, двете входни променливи (токът и съпротивлението) се „борят“ помежду си да променят в противоположни посоки изходната величина (напрежението). Има три възможни ситуации: първата променлива да доминира, двете променливи да се компенсират взаимно и накрая, втората променлива да доминира. Първо, ако промяната на съпротивлението е по-слаба в сравнение с промяната на тока, напрежението само намалява скоростта си на промяна, но все пак продължава да нараства. Ако двете скорости на промяна са еднакви, напрежението не се променя въобще. В последния случай, съпротивлението се изменя по-бързо от тока и напрежението намалява непрекъснато. В електрониката, тиристорите и неоновите лампи действат по този начин (в определена част от характеристиката си).



Фиг. 3.43. Превръщане на положителното съпротивление в отрицателно динамично съпротивление от S-тип в участъка 3-4.

В графичното представяне (фиг. 3.43), когато токът на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 3 до точка 4, неговата волт-амперна характеристика продължава да се мести във вертикална посока, оставайки успоредна сама на себе си. Но сега, понеже започваме да намаляваме изключително енергично съпротивлението, волт-амперната характеристика на омичния резистор се върти свръхенергично около началото на координатната система в посока, обратна на часовниковата стрелка. В резултат на това, работната точка А се плъзга нагоре от точка 3 до точка 4 по новата волт-амперна

3.1.2. МОДИФИЦИРАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧРЕЗ ДИНАМИЗАЦИЯ НА ИМПЕДАНСА

характеристика на отрицателното диференциално съпротивление $dR_3 < 0$. Тя е наклонена (прегъната) наляво и има отрицателен наклон.

6. След участъка с отрицателно съпротивление...

За съжаление, няма неограничени неща в нашия свят. Затова, достигайки точка 4, ние вече сме изразходвали голяма част от първоначалното съпротивление и започваме да намаляваме скоростта му на промяна. Така можем да създадем последователно нулево, увеличено и накрая пак омично съпротивление. Волт-амперната характеристика постепенно се прегъва обратно по посока на часовниковата стрелка и формата ѝ наподобява буквата „S”.

7. Основни изводи за S-тип ОДС:

- Резисторът с отрицателно диференциално съпротивление от S-тип представлява „свръхенергичен” напреженово-стабилизиращ нелинеен резистор.
- Когато токът, протичащ през него, расте, той намалява неимоверно моментното си омично съпротивление така, че напрежението върху него намалява вместо да се увеличава.
- Когато токът се изменя от нула до максимум, резисторът с отрицателно диференциално съпротивление от S-тип започва с високо начално съпротивление (за да намалява след това, трябва да има какво да се намалява) и завършва с ниско крайно съпротивление.

3.1.2.2. ВИРТУАЛНО УВЕЛИЧАВАНЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕ

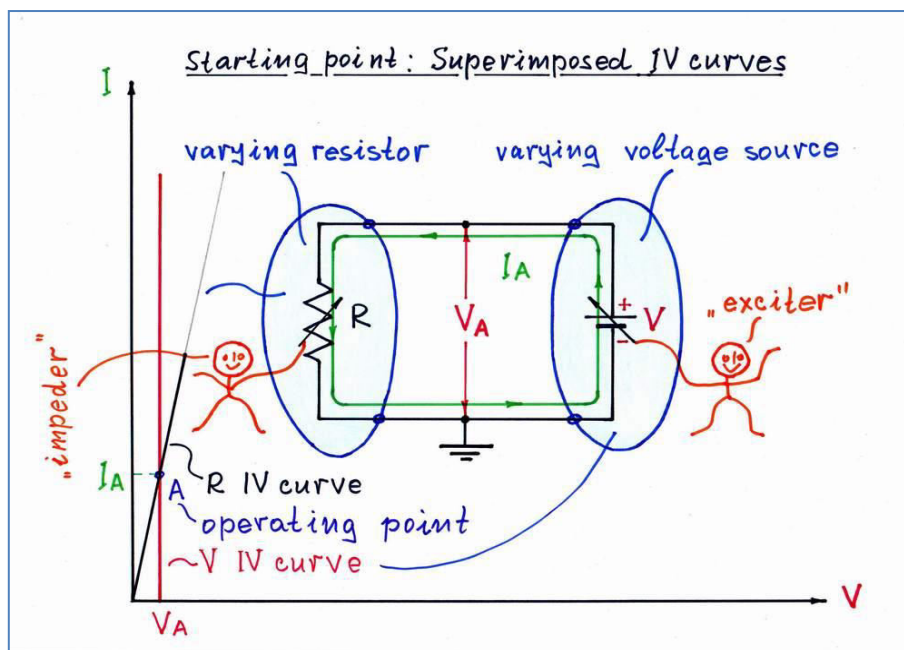
1. Опитна постановка за емулиране на ОДР.

По аналогичен начин, като проследим метаморфозата на един обикновен омичен резистор в *динамичен резистор*, можем да превърнем омичния резистор във *виртуално увеличен, безкрайно голям и N-тип отрицателен диференциален резистор*.

За да емулираме всичките тези видове динамични резистори трябва да модифицираме опитната постановка от фиг. 3.39 като заместим входния източник на ток с източник на напрежение – фиг. 3.44.

2. Ниско начално омично съпротивление.

Нека да разгледаме дуалната на фиг. 3.40 житейска ситуация, когато прилагайки някаква величина от вида „налягане” и срещайки постоянна, но малка по стойност съпротива, получената величина от вида „поток” е пропорционална на нашите усилия. Така например, във „водопроводната” аналогия, когато сме отворили значително крана, а някой плавно увеличава чрез главния спирателен кран налягането на водата в тръбопровода, дебитът на водата в тръбопровода започва да расте пропорционално на налягането (това изразява по още един начин закона на Ом в хидравликата).

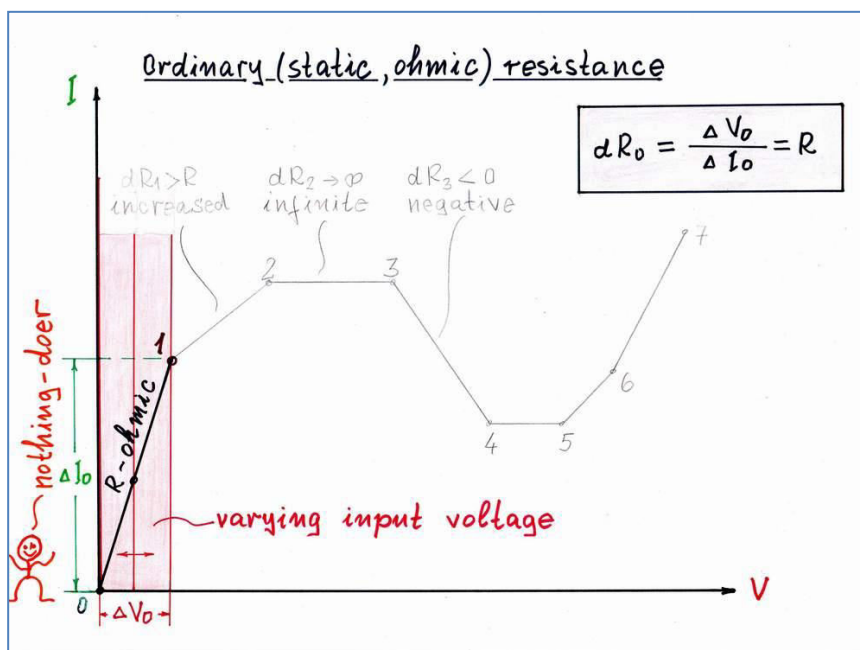


Фиг. 3.44. Изходна постановка за „ръчно” емулиране на динамично „нарастващо” съпротивление.

Нека отново пренесем тази житейска ситуация в опитната постановка от фиг. 3.44. В началото установяваме плъзгача на реостата в крайно положение, но сега с най-малко съпротивление (за да можем да го увеличаваме впоследствие). Когато входното напрежение V_{IN} започне да нараства линейно, през резистора започва да тече ток I_{OUT} , който нараства линейно. Съгласно закона на Ом (записан по малко по-различен начин), той е пропорционален на напрежението, приложено върху резистора - $I_{OUT} = V_{IN}/R$. Токът зависи само от напрежението и изразът представлява функция на една променлива.

В графичното представяне (фиг. 3.45), когато напрежението на входния източник се изменя, неговата волт-амперна характеристика започва да се мести в хоризонтална посока като остава успоредна сама на себе си.

Работната точка А се плъзга по волт-амперната характеристика на омичния резистор в участъка от точка 0 до точка 1, който представлява част от права линия. Наклонът на волт-амперната характеристика на резистора представя графично стойността на неговото съпротивление – както на фиг. 4.40, то е едно статично, неизменно по стойност стойност и равно на диференциалното съпротивление $dR_0 = R$ съпротивление, което не зависи от положението на работната точка А.



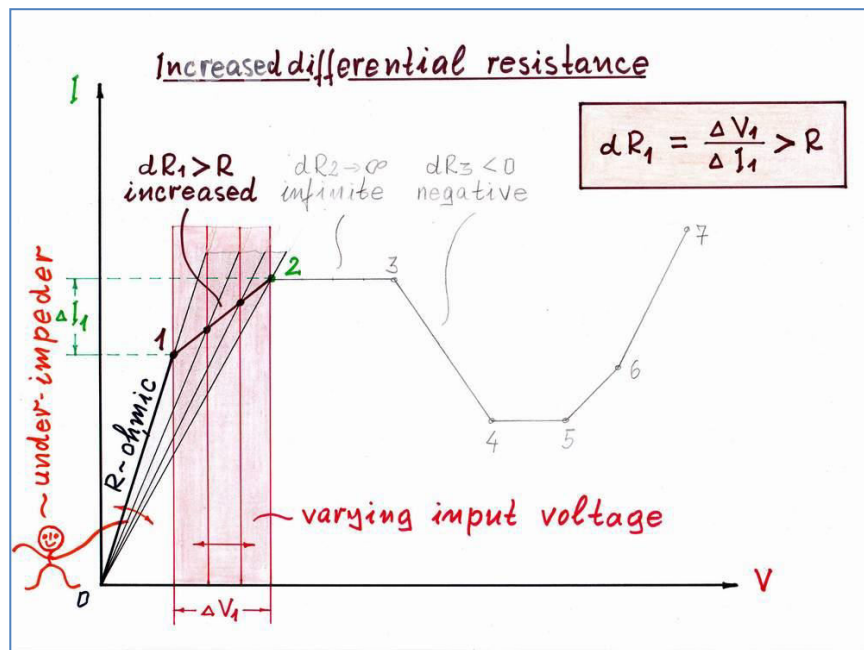
Фиг. 3.45. В участъка 0-1 се наблюдава съпротивление с малка, но постоянна стойност (омично съпротивление).

3. Виртуално увеличено съпротивление.

Припомняме си отново, че в живота има житейски ситуации, в които степента на съпротивата, която изпитваме, се променя динамично. Сега този, който ни се противопоставя, увеличава (незабелязано за самите нас) първоначалната си съпротива. В резултат на това, ние имаме илюзията, че силата на съпротивата се е увеличила и съответно, „потокът” е намалял. Така например, ако във „водопроводната” аналогия започнем да затваряме постепенно крана, когато налягането на водния поток расте, дебитът на водата в тръбопровода ще нараства по-бавно и това ще създава илюзията, че водното съпротивление се е увеличило.

Нека сега с помощта на такава една „динамизация” да увеличим виртуално съпротивлението R в постановката от фиг. 3.44. За целта, когато достигнем точка 1 (фиг. 3.46), започваме да движим леко плъзгача на реостата в такава посока, че да увеличаваме постепенно съпротивлението му. В резултат на това, токът започва да зависи както от напрежението, така и от съпротивлението и законът на Ом става функция на две променливи - $I_{OUT} = V_{IN1}/R_{IN2}$. Сега, ако входното напрежение V_{IN1} расте, съпротивлението R_{IN2} расте слабо и тяхното отношение V_{OUT}/R_{IN2} се увеличава по-бавно, отколкото в случая на постоянно съпротивление. Ние имаме илюзията, че съпротивлението R се е увеличило постоянно, но фактически то *нараства непрекъснато* и ние виждаме едно ново, по-голямо по стойност динамично (диференциално) съпротивление $dR > R$. „Статичното” съпротивление R сякаш е преобразувано в едно по-голямо по стойност диференциално съпротивление dR . Такава характеристика имат например лампите с нажежаема жичка.

Представено графично (фиг. 3.46), когато напрежението на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 1 до точка 2, неговата волт-амперна характеристика продължава да се мести в хоризонтална посока като остава успоредна на себе си. Но в същото време ние започваме да увеличаваме постепенно съпротивлението и волт-амперната характеристика на омичния резистор започва да се върти около началото на координатната система в посока по часовниковата стрелка. В резултат на това, работната точка А се плъзга по нова волт-амперна характеристика с по-малък наклон, която представя новото динамично съпротивление $dR_1 > R$.

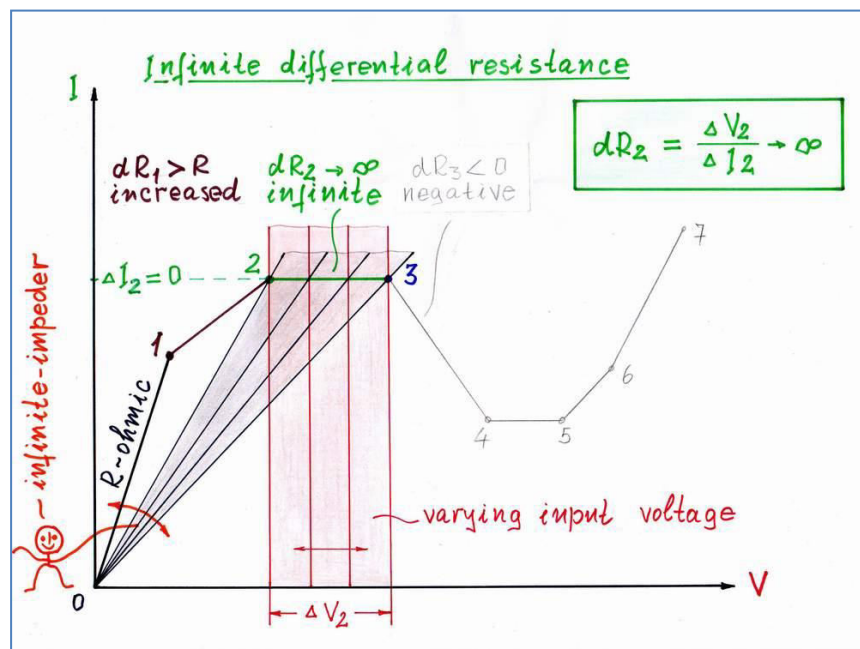


Фиг. 3.46. Виртуално увеличаване на съпротивление в участъка 1-2.

4. Безкрайно голямо съпротивление.

Както в случая на нулевото динамично съпротивление (фиг. 3.42) и тук можем да развием идеята на динамизацията така, че степента на съпротивата, която изпитваме, да е неимоверно увеличена, когато осъществяваме целите си. Резултатът е отново поразителен, но по друг начин – сега ние имаме илюзията, че съпротивата е безкрайно голяма и величината от типа „поток” стои неизменна, когато входната величина от типа „налягане” се променя. Например, ако във „водопроводната” аналогия започнем да затваряме крана със същата скорост, с каквата се отваря и входният кран, налягането и съпротивлението ще се променят еднакво, но в различни посоки. Резултатът ще бъде същият - когато налягането на водния поток расте, дебитът на водата в тръбопровода въобще няма да се променя и това ще ни създаде илюзията, че има безкрайно голямо водно съпротивление (но само по отношение на промяната).

Тази идея можем да приложим в електрониката, като засилим значително идеята на динамизацията за да увеличим виртуално до безкрайност съпротивлението R в постановката от фиг. 3.44. За целта, когато достигнем точка 2 (фиг. 3.47), започваме да движим достатъчно енергично плъзгача на реостата за да увеличаваме достатъчно значително съпротивлението му. По този начин, в закона на Ом ($I_{OUT} = V_{IN1}/R_{IN2}$) входното напрежение V_{IN1} и съпротивление R_{IN2} нарастват с еднаква скорост, в резултат на което отношението им I_{OUT} не се променя. Сега ние имаме чувството, че пред нас стои безкрайно голямо съпротивление и входният източник на напрежение работи на „празен ход“, когато си изменя напрежението. На практика, по този начин сме направили един *токово-стабилизиращ двуполусник* (стабилизатор на ток). Изходната част (колектор-емитер, дрейн-сорс) на всички видове транзистори (биполярни, полеви, МОС и др.), електронни лампи и безконтактни предпазители действат по този начин.



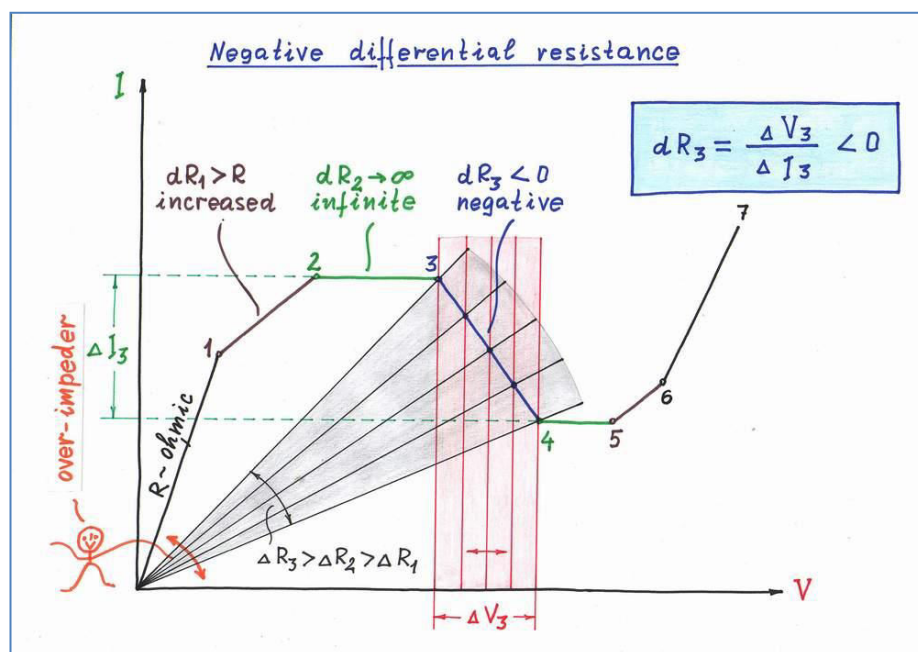
Фиг. 3.47. Получаване на увеличено до безкрайност виртуално съпротивление в участъка 2-3.

В графичното представяне (фиг. 3.47), когато напрежението на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 2 до точка 3, неговата волт-амперна характеристика продължава да се мести в хоризонтална посока, като остава успоредна на себе си. Но в същото време ние започваме да увеличаваме значително съпротивлението и затова волт-амперната характеристика на омичния резистор се върти енергично около началото на координатната система в посока по часовниковата стрелка. Работната точка А се плъзга надясно от точка 2 до точка 3 по новата *хоризонтална* волт-амперна характеристика, която представя безкрайно голямото динамично съпротивление $dR_2 = \infty$.

5. Отрицателно диференциално съпротивление от N-тип.

Нека в края на това „пътешествие” по еволюционната стълбичка на динамичното съпротивление да развием неимоверно идеята на динамизацията, така че степента на съпротивата, която изпитваме, да бъде увеличена многократно повече от необходимото. Резултатът е отново съвсем неочакван - ние увеличаваме входната величина от типа „налягане”, а „потокът” намалява! По-конкретно, във „водопроводната” аналогия, когато някой започне да отваря главния спирателен кран, ние започваме да затваряме нашия кран с още по-голяма скорост от тази, с която налягането на входния воден поток нараства. Резултатът е наистина изненадващ - налягането на водния поток расте, а дебитът му спада, вместо да расте!

Прилагаме тази последна плодотворна идея в електрониката, за да превърнем „положителното” съпротивление R от постановката на фиг. 3.44 в едно „нарастащо” отрицателно диференциално съпротивление. Сега това означава да накараме токово-стабилизиращият двуполусник от предишната стъпка да се „престарава”, когато изменя съпротивлението си.



Фиг. 3.48. Превръщане на положителното съпротивление в отрицателно динамично съпротивление от N-тип в участъка 3-4.

За целта, когато достигнем точка 3 (фиг. 3.48), започваме да движим изключително интензивно плъзгача на реостата за да увеличаваме бурно съпротивлението му. Ситуацията със закона на Ом ($I_{OUT} = V_{IN1}/R_{IN2}$) става отново изключително интересна – входното напрежение V_{IN1} расте, но съпротивлението R_{IN2} се увеличава по-бързо от него и в резултат на това

отношението им I_{OUT} намалява също. Това е отново феноменът на отрицателното съпротивление, проявен в неговата втора разновидност – ние увеличаваме входната променлива (напрежението), но изходната (токът) намалява, противно на нашите очаквания.

Образно казано, както и при „намаляващото” отрицателно съпротивление, двете входни променливи (напрежението и съпротивлението) се „борят” помежду си да променят в противоположни посоки изходната величина (тока). Отново са налице трите възможни ситуации: първата променлива да доминира, двете променливи да се компенсират взаимно и накрая, втората променлива да доминира. Първо, ако промяната на съпротивлението е по-слаба в сравнение с промяната на напрежението, токът само намалява скоростта си на промяна, но все пак продължава да нараства. Ако двете скорости на промяна са еднакви, токът не се променя въобще. В последния случай, съпротивлението се изменя по-бързо от напрежението и токът намалява непрекъснато. В електрониката, *тунелните диоди*, *Гън диодите* и *лямбда диодите* действат по този начин (в определена част от характеристиката си).

Представено графично (фиг. 3.48), когато напрежението на входния източник продължава да се увеличава в участъка от точка 3 до точка 4, неговата волт-амперна характеристика продължава да се мести в хоризонтална посока, оставайки успоредна сама на себе си. Но сега, понеже започваме да увеличаваме изключително енергично съпротивлението, волт-амперната характеристика на омичния резистор се върти свръхенергично около началото на координатната система в посока по часовниковата стрелка. Работната точка А се плъзга *надолу* от точка 3 до точка 4 по новата волт-амперна характеристика на отрицателното диференциално съпротивление $dR_3 < 0$. Тя пак има отрицателен наклон, но за разлика от „намаляващото” отрицателно диференциално съпротивление, сега тя е наклонена (прегъната) надясно.

6. След участъка с отрицателно съпротивление...

И понеже няма неограничени неща в нашия свят констатираме, че достигайки точка 4, ние вече сме изразходвали голяма част от първоначалната проводимост и започваме да намаляваме скоростта ѝ на промяна. Така можем да създадем последователно безкрайно, намалено и накрая пак омично съпротивление. Волт-амперната характеристика постепенно се прегъва по посока на часовниковата стрелка и формата ѝ наподобява буквата „N”.

7. Основни изводи за N-тип ОДС:

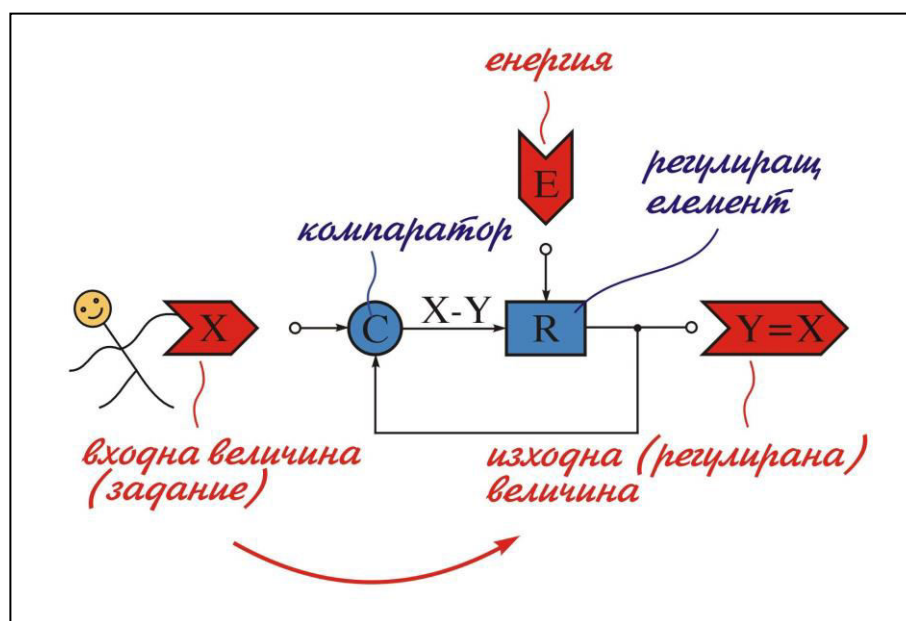
- Резисторът с отрицателно диференциално съпротивление от N-тип представлява „свръхенергичен” токово-стабилизиращ нелинеен резистор.
- Когато напрежението, приложено върху него, расте, той увеличава неимоверно моментното си омично съпротивление така, че токът, протичащ през него, намалява вместо да нараства.
- Когато токът се изменя от нула до максимум, резисторът с отрицателно диференциално съпротивление от N-тип започва с ниско начално съпротивление (за да се увеличава след това, трябва да има какво да се увеличава) и завършва с високо крайно съпротивление.

3.1.3. ИЗГРАЖДАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ ЧРЕЗ ВЗАИМОДЕЙСТВАЩИ СИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИЦИ

Това е също една фундаментална идея, която може да се пренесе от човешкото ежедневие в схемотехниката. Чрез нея може да се обяснят, представят и дори изобретяват нови електронни схеми, традиционно анализирани с формални средства: аналогови усилвателни стъпала с динамичен товар (схема “обща база”, транзисторни стъпала с динамичен товар в колектора, интегрални структури на операционни усилватели и др.), както и цифрови схеми (транзисторно-транзисторни логически схеми ТТЛ, емитерно-свързани схеми ECL, диференциални ECL и др.)

В аналоговата схемотехника може да се наблюдава *конфликт* и *подпомагане* между електрически източници. Така например, когато се анализира действието на системите с отрицателна обратна връзка с помощта на евристичния подход, често може да се наблюдава феномена *усилване чрез конфликт*. Уникален и дори абсурден, но в същото време полезен, той позволява да се разкрие идеята на цял клас от легендарни схеми и да се представи ефектно действието им [40].

За да се промени изходната величина Y на една система-повторител с отрицателна обратна връзка (фиг. 3.49) е обичайно да се промени заданието X (входната величина) на системата (т.е., изходната величина се променя косвено чрез входната величина).



Фиг. 3.49. Входната величина X на една система-повторител с отрицателна обратна връзка управлява косвено изходната ѝ величина Y .

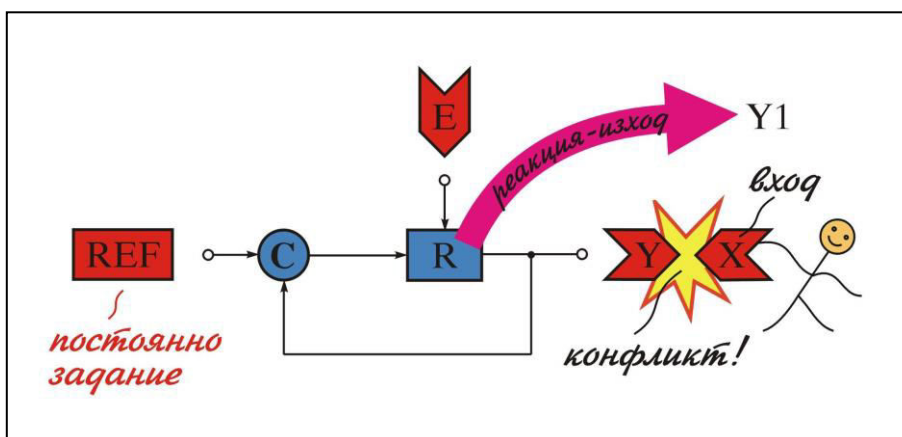
Как постъпваме например, ако действията на определен човек не ни се нравят? Стараем се да го убедим той сам да промени поведението си... Един забавен пример от градския транспорт е, когато искаме да преминем напред в автобуса, но някой ни пречи. Обичайното

решение на проблема е да го помолим учтиво да ни направи път (да промени „заданието“ си), тогава той услужливо се отмества.

Какво ще стане обаче, ако се направи опит сигнала Y да се промени не косвено, а директно, като се атакува “силово” изхода на системата с величината X при постоянно задание на входа Y (такава система-повторител с отрицателна обратна връзка и постоянно задание е известна като *система-стабилизатор*.) - фиг. 3.50?

В живота това означава да се направи опит за насилствена промяна на резултата от действията на определен човек. Очевидно възниква конфликт - той реагира на това въздействие, като се опитва да възстанови предишното състояние на нещата. В нашия забавен пример, ако вместо да помолим човека да ни направи път, просто го отместим от пътеката в автобуса, може да ни се случи нещо непредвидено ☺.

Конфликт се получава, защото основната задача на системата-стабилизатор е да поддържа неизменна величината Y при неизменна входна величина REF. Поради това тя реагира на опита за промяна на изходния Y сигнал, в резултат на което се превръща в усилвател. Така смущащото въздействие X в изхода на системата-стабилизатор представлява входен сигнал на новата система-усилвател, а реакцията $Y1$ на това смущение - изходен сигнал $Y1$.



Фиг. 3.50. Системата-стабилизатор реагира на опита за директна промяна на изходния Y сигнал, в резултат на което се превръща в усилвател.

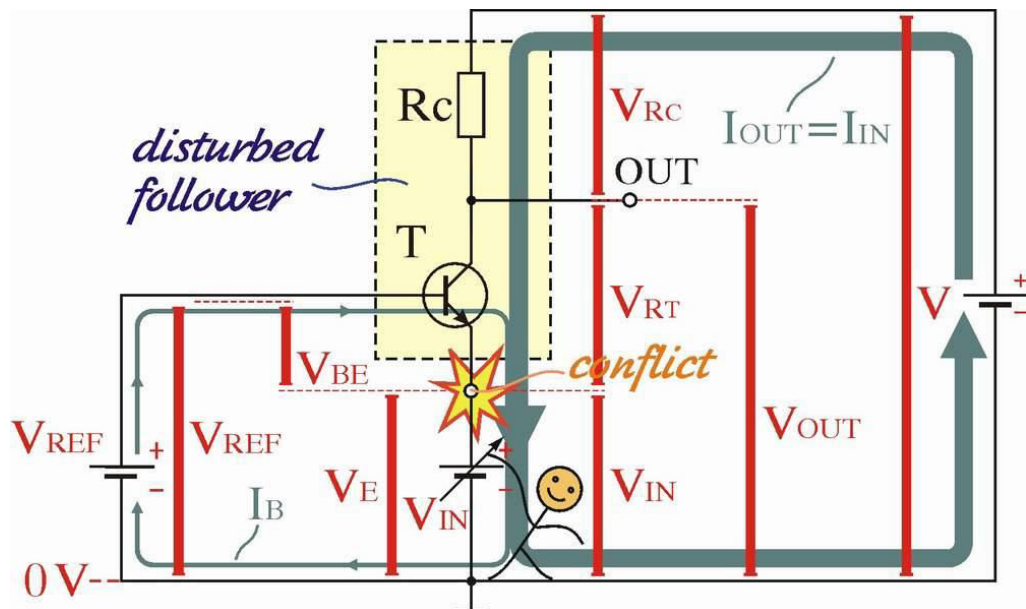
В аналоговата схемотехника може да се наблюдават конфликти *между източници на напрежение* (схема “обща база”, емитерно-свързани схеми, диференциален усилвател) и *между източници на ток* (усилвателни стъпала с динамичен товар). В първия случай реакцията на “смутената” система е токова, а във втория - напреженова.

3.1.3.1. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ИЗТОЧНИЦИ НА НАПРЕЖЕНИЕ

1. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ПРОМЕНЛИВ И ПОСТОЯНЕН ИЗТОЧНИК НА НАПРЕЖЕНИЕ

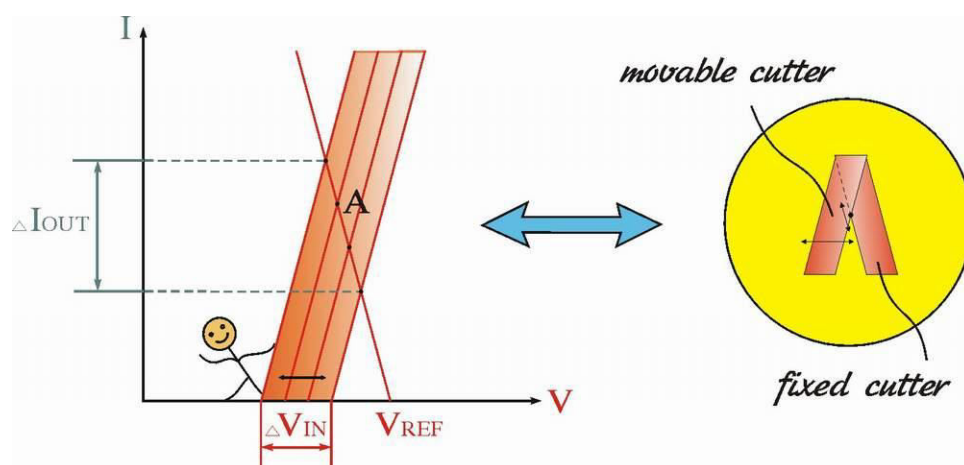
Този клас от схеми могат да бъдат представени чрез еквивалентна електрическа схема от два източника на напрежение (напреженово-стабилизиращи елементи), свързани паралелно. Единият от тях (опорен) е задал постоянно напрежение, а другият (входен) се опитва да го промени. Опорният източник реагира на опита за промяна и неговата токова реакция, преобразувана в напреженова, служи за изходен сигнал.

Транзисторно усилвателно стъпало „обща база“. Чрез този функционален подход класическата транзисторна схема *обща база* може да се представи като умишлено „смутена“ в изхода схема *общ колектор* при постоянно напрежение на входа (фиг. 3.51). Транзисторът Т, изпълнявайки ролята на регулиращия елемент R, е “изкопирал” постоянното задаващо напрежение V_{REF} в емитера си като “твърд” потенциал $V_e = V_{REF}$. Ако се направи опит той да бъде променен, като се приложи входно напрежение V_{in} директно в емитера, възниква конфликт между двата източника на напрежение (емитерния повторител Т и входния източник V_{in}). Транзисторът реагира на тази интервенция, като променя текущото си съпротивление R_T , съответно тока I_{out} във веригата, с което се опитва да възстанови предишната стойност на V_e . Тази токова реакция се преобразува от резистора R_c в напреженова и нейното “допълнение” V_{out} до захранващото напрежение V се явява изходна величина за новата схема.



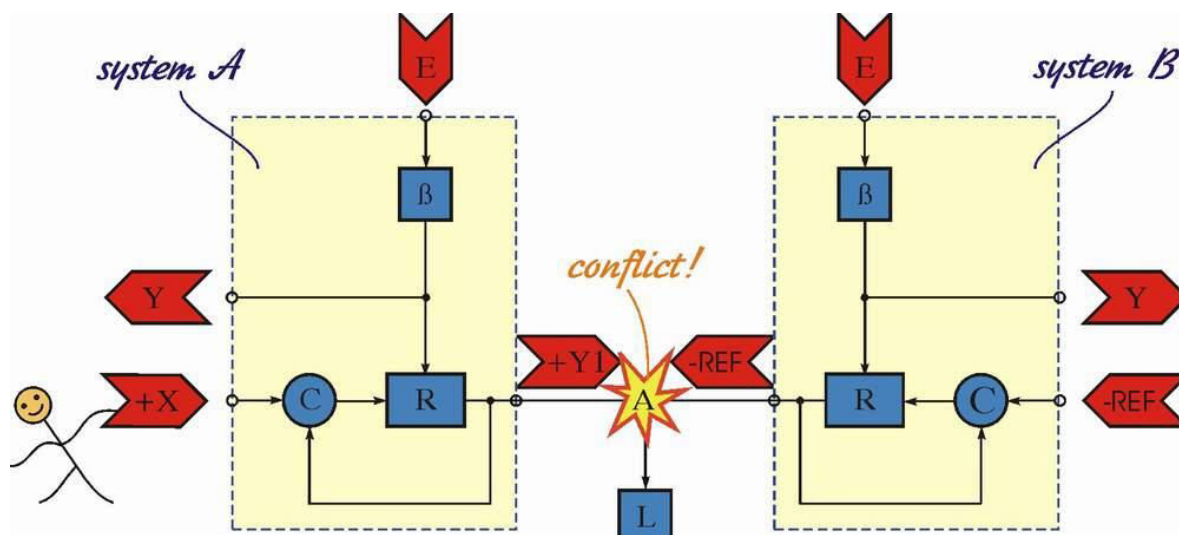
Фиг. 3.51. Схема *обща база* представлява „смутена“ в изхода схема *общ колектор* (емитерен повторител) с постоянно напрежение на входа.

Една геометрична интерпретация на този феномен е показана на фиг. 3.52. Когато се променя напрежението V_{in} на входния източник, волт-амперната му характеристика започва да се движи успоредно на себе си в хоризонтална посока, а работната точка A се движи вертикално по неподвижната волт-амперна характеристика на втория източник $V_e = V_{REF}$. Понеже двете характеристики сключват малък ъгъл помежду си (при идеални източници на напрежение те са почти успоредни една на друга), малки промени на входното напрежение предизвикват големи промени на изходния ток. Получава се един своеобразен геометричен усилвател и преобразувател на посоката на движение, който може да се наблюдава например в една гилотина, в растерните преобразуватели и в някои ефектни светещи реклами (така наречените *маурови ивици*).



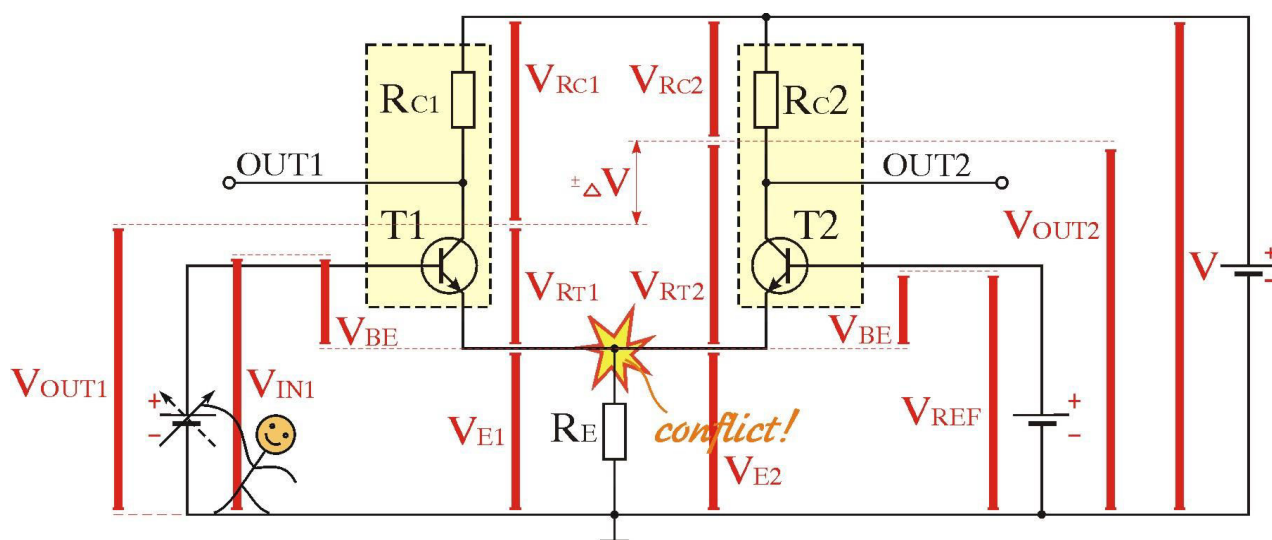
Фиг. 3.52. Геометрична интерпретация на феномена „конфликт между постоянен и променлив източник на напрежение”.

Диференциален усилвател с единичен вход (усилвател с емитерна връзка). Когато един входен източник атакува активния повторител в изхода, той е принуден да търпи неговата реакция. В конкретния случай, през “опорния” източник V_{REF} на схема *обща база* (фиг. 3.51 по-горе) тече малкият базов ток на транзистора T , а през входния източник V_{in} - целият изходен ток на емитерния повторител. Съвсем естествено се ражда идеята да се буферира източника V_{in} с още един идентичен активен повторител. Така се получава сдвоената симетрична конструкция от фиг. 3.53 по-долу, съставена от две еднакви системи с отрицателна обратна връзка, изходите на които са свързани заедно към един общ товар L . В конкретната реализация - фиг. 3.54, емитерите на транзисторите T_1 и T_2 са свързани заедно към общия резистор R_e .



Фиг. 3.53. Конфликт между две системи с отрицателна обратна връзка, изходите на които са свързани заедно към един общ товар.

Ако едната система поддържа постоянна изходната си величина Y , а другата се стреми да я промени, в общата точка възниква конфликт, който превръща системата-стабилизатор в усилвател.

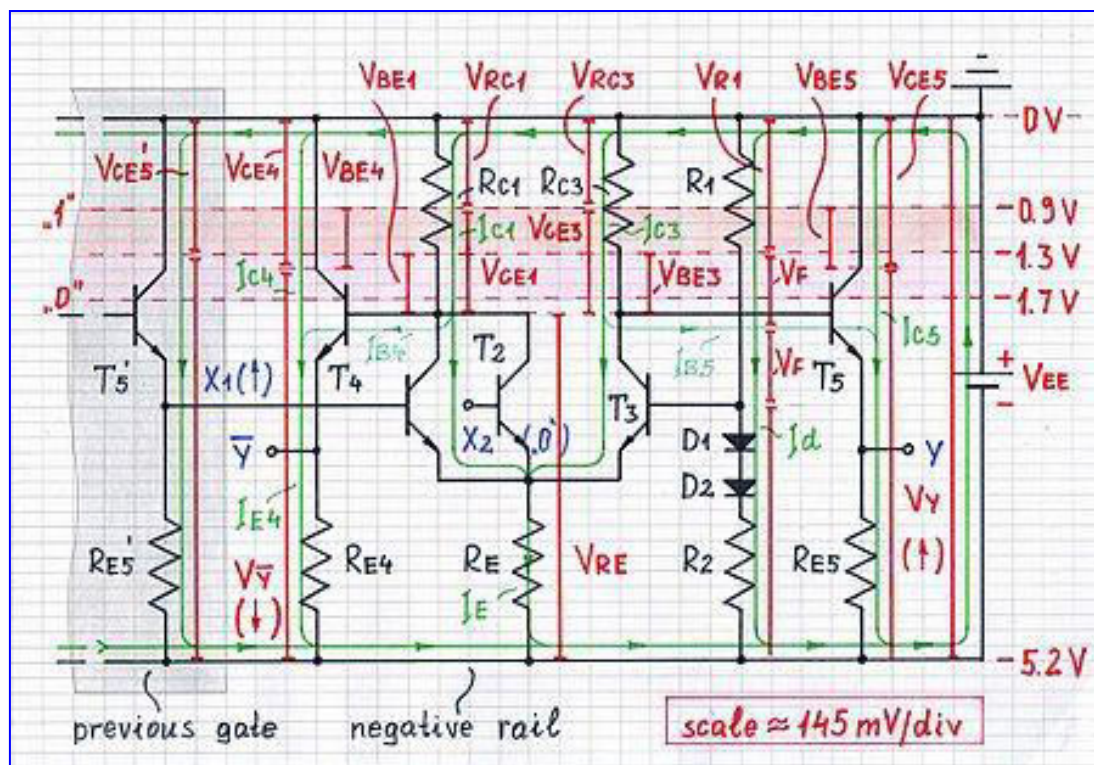


Фиг. 3.54. Конфликт между два повторителя на напрежение в един диференциален усилвател с емитерно-свързани транзистори.

Така се получава класическата *емитерно-свързана* схема, в която транзисторите се "борят" помежду си (T2 - да запази напрежението върху емитерния резистор постоянно, а T1 - да го промени). В резултат на това, повторителят на напрежение, реализиран с T2 се превръща в усилвател. Напрежението върху резистора R_{c2} на "смутената" система-повторител и неговото

„допълнение” V_{out2} отразяват степента на конфликта между двата емитерни повторителя и представляват изходен сигнал на схемата.

Емитерно-свързани логически схеми. Конфликт между два източника на напрежение може да бъде наблюдаван и във входното стъпало на една емитерно-свързана логическа схема (ECL) по време на прехода на входното напрежение [41, 42].

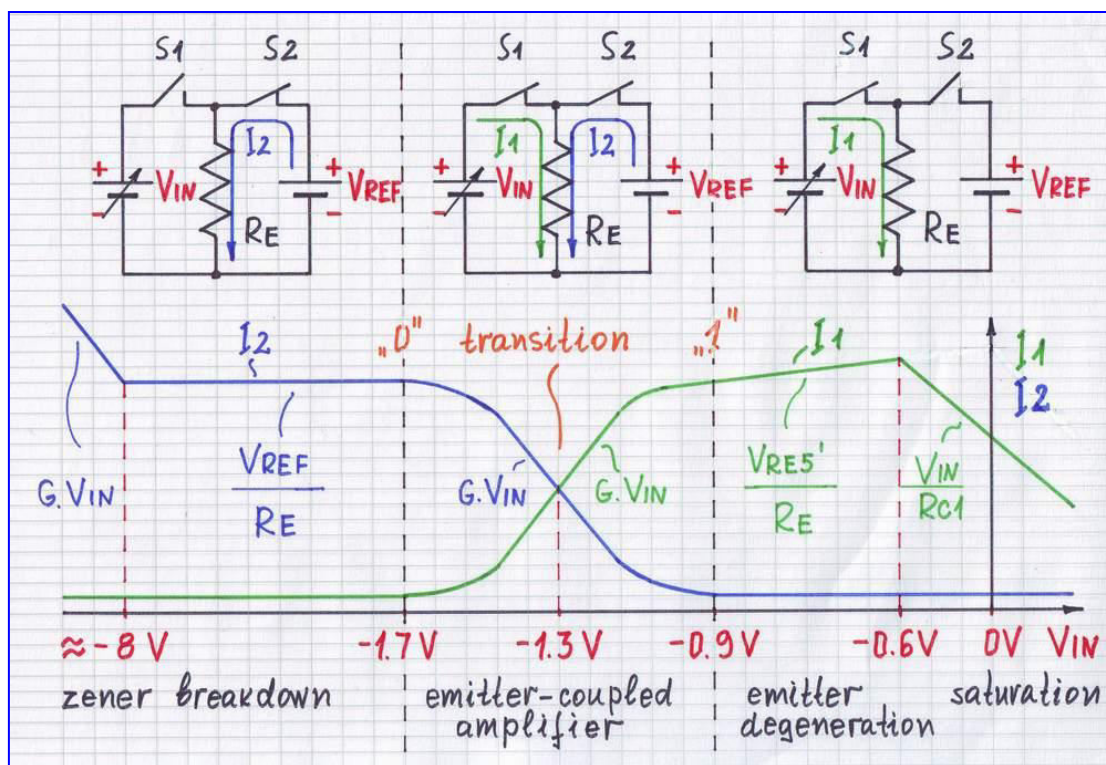


Фиг. 3.55. Конфликт между два повторителя на напрежение във входното стъпало на една емитерно-свързана логическа схема (ECL).

То се състои (фиг. 3.55) от два източника на напрежение (емитерните повторители, реализирани с транзисторите $T1$ и $T3$), включени паралелно и захранени последователно от един общ източник на ток (общият емитерен резистор R_E захранван от V_{EE}). Транзисторът $T3$ „изкопирва” в емитера си опорното напрежение V_{RE} , задавано от веригата $R1-D1-D2-R2$, а транзисторът $T1$ изкопирва в емитера си входното напрежение $V_{RE5'}$. Двата източника са в конфликт, защото десният източник ($T3$) прави всичко възможно да поддържа постоянно емитерното напрежение, докато левият източник ($T1$) се опитва да го увеличи. Тези два източника на напрежение представляват всъщност системи с отрицателна обратна връзка, които реагират на всяка интервенция, приложена на изходите им. Така, че когато $T1$ започне да се отпуска за да увеличи емитерния си ток и напрежение, като отговор $T3$ започва да се запуща за да намали емитерния си ток и напрежение. В резултат на това, колекторният ток се „прелива” стръмно от дясната към лявата страна при почти постоянно емитерно напрежение.

3.1.3.1. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ИЗТОЧНИЦИ НА НАПРЕЖЕНИЕ

По време на прехода входното съпротивление е ниско, понеже схемата се държи като стъпало *общ емитер* с относително постоянно емитерно напрежение. Почти няма отрицателна обратна връзка във входното стъпало понеже емитерното съпротивление е много малко.



Фиг. 3.56. Идеята на една ECL логическа схема, представена чрез еквивалентна електрическа схема.

На фиг. 3.56 е показано как се изменят двата колекторни тока по време на прехода. В средата на прехода двата тока се изменят (преливат) стръмно. В края на прехода, когато входното напрежение достигне ниво около -1 V, колекторният ток на транзистора T1 започва да се изменя слабо, което може да се обясни по следния начин. По време на прехода десният (опорният) емитерен повторител T3 е свързан с емитера на транзистора T1 и фиксира неговото напрежение (образно казано, опорният емитерен повторител T3 шунтира емитерното съпротивление по време на прехода). В резултат на това, няма отрицателна обратна връзка във входното стъпало, емитерното му напрежение е „твърдо“, неизменно и стъпалото действа почти като схема *общ емитер* с голям коефициент на усилване. В края на прехода, опорният емитерен повторител T3 се „откача“ от емитера на T1, емитерният резистор се „появява“ и предизвиква последователна отрицателна обратна връзка (емитерна дегенерация). Входното стъпало вече действа като схема *общ колектор* с „меко“, податливо на промени емитерно напрежение, което следва входното напрежение. Като резултат, колекторният ток на транзистора T1 става $I_{C1} = I_{RE}$

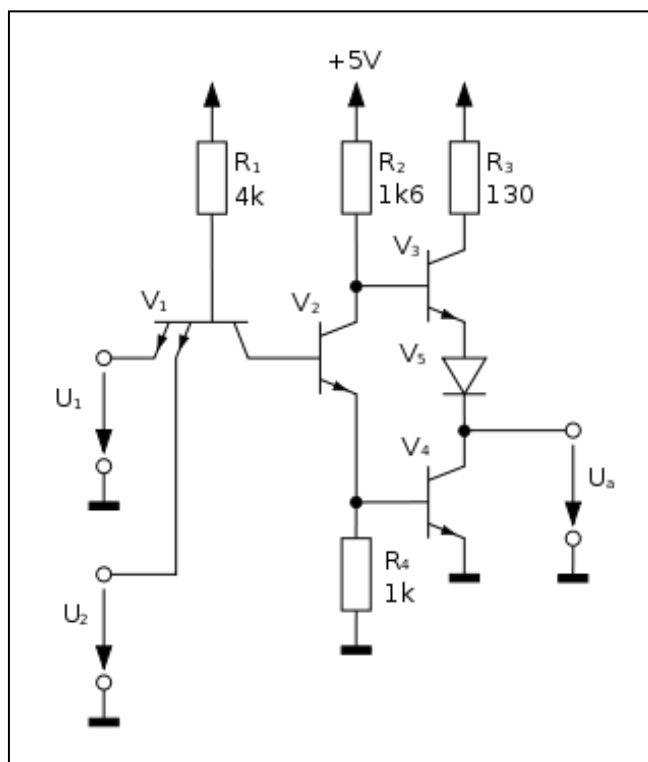
3.1.3.1. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ИЗТОЧНИЦИ НА НАПРЕЖЕНИЕ

$= (V_{RE5'} - V_{BE1})/R_E$ и неговата крива забавя промяната си. Съответно, V_{C1} и V_Y продължават да се изменят бавно (логическата нула на инвертиращия изход зависи слабо от входното напрежение). Такъв проблем няма с колекторния ток на транзистора Т3 в началото на прехода, понеже той е зададен от постоянното опорно напрежение (изходната логическа нула не зависи от входното напрежение).

Диодни превключващи схеми. Същият феномен може да бъде наблюдаван и в действието на множество схеми, използващи диодни елементи като ключове. Той е известен под името *current steering* (токово пренасочване или превключване) и може да бъде дефиниран по следния начин:

Ако два диодни елемента (напреженово-стабилизиращи двуполусници) с различно прагово напрежение бъдат свързани паралелно, токът протича през елемента с по-ниското прагово напрежение.

♦ **Транзисторно-транзисторни логически елементи (TTL).** Ако входът на един TTL логически елемент (фиг. 3.57) бъде свързан към маса (входна логическа нула) [43], един преход база-емитер на входния многоемитерен транзистор V1 се включва паралелно на два последователно свързани прехода (база-колектор на многоемитерния транзистор V1 и база-емитер на втория транзистор V2). В резултат на това, входният преход поглъща целия базов ток на втория транзистор и той се запуща.



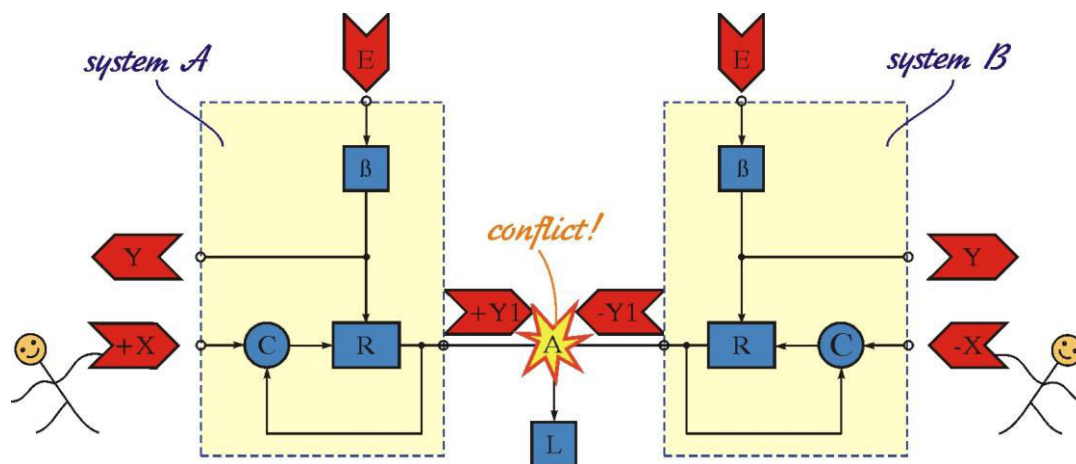
Фиг. 3.57. В една TTL схема идеята на токовото превключване се използва на две места (във входното и в изходното стъпало на схемата).

Същият „трик“ е използван и в изходното стъпало на TTL елемента от типа *сложен инвертор (totem-pole stage)*, където при изходна логическа нула един преход *база-емитер* на долния изходен транзистор V4 се включва паралелно на последователно свързаните преход *база-емитер* на горния изходен транзистор V3 и „отместващ“ диод V5. В резултат на това, преходът *база-емитер* на транзистора V4 поглъща целия базов ток на транзистора V3 и го запущва сигурно.

♦ **Автокомутация на светодиоди.** По същия начин, ако два светодиода с различно прагово напрежение бъдат свързани паралелно, остава да свети светодиодът с по-ниското прагово напрежение. Този феномен се използва за опростяване на управлението им (светодиодите се комутират чрез включване, а не чрез превключване). Примери за това е разработеният от автора светодиоден индикатор на напрежение.

2. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ДВА ПРОМЕНЛИВИ ИЗТОЧНИКА НА НАПРЕЖЕНИЕ

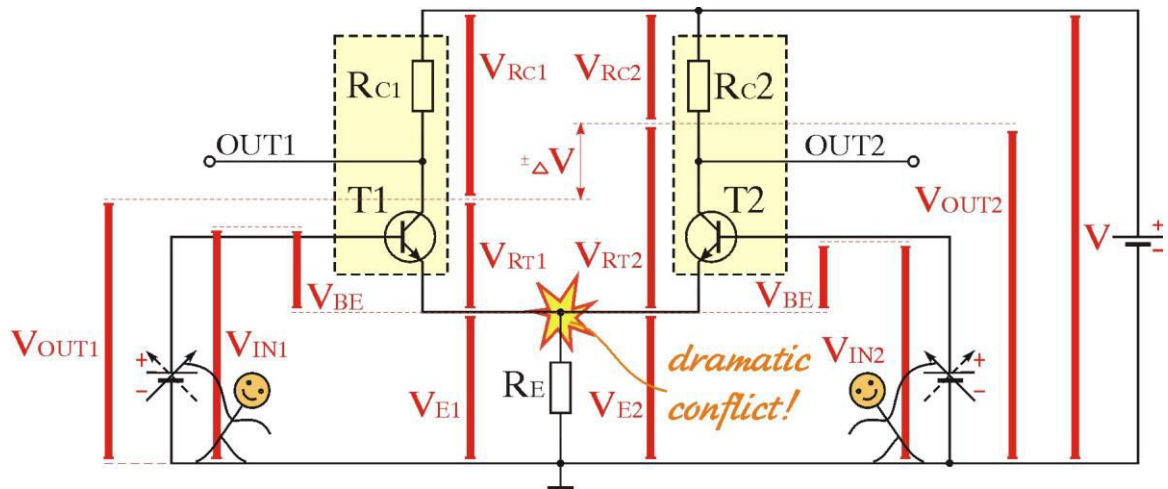
Когато заданията X на двете системи се изменят едновременно и противоположно (диференциално) – фиг. 3.58, конфликтът се задълбочава още повече - житейски примери за това са играта “теглене на въже”, канадската борба и др. [44].



Фиг. 3.58. Конфликт между две системи с отрицателна обратна връзка, изходите на които са свързани заедно към един общ товар.

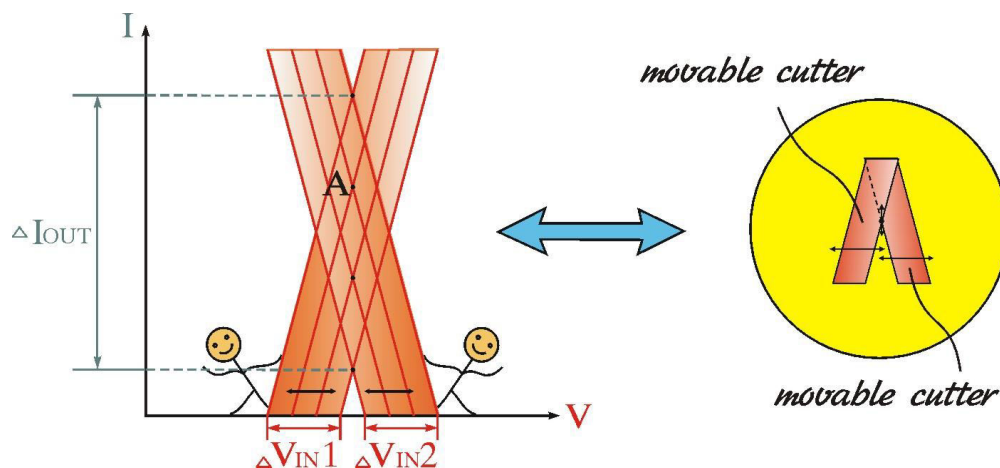
Този клас от схеми могат да бъдат представени чрез аналогична еквивалентна електрическа схема от два източника на напрежение (напреженово-стабилизиращи елементи), свързани паралелно. Единият от тях изменя напрежението си в една посока, а другият – в противоположна посока. В резултат на това и двата източника реагират на взаимните си опити за промяна и техните токови реакции, преобразувани в напреженови, служат за изходен сигнал.

Например, в конкретната схема на един диференциален усилвател (фиг. 3.59) транзисторите T1 и T2 действат с еднаква “сила” върху точката на конфликта (горната част на резистора R_E), която остава с неизменен потенциал. Реакциите на двата емитерни повторителя - напреженията U_{out1} и U_{out2} , са симетрични и представляват изходни сигнали на схемата.



Фиг. 3.59. Конфликт между два повторителя на напрежение в един диференциален усилвател с емитерно-свързани транзистори.

В геометричната интерпретация на този феномен (фиг. 3.60) и двете волт-амперни характеристики се движат едновременно и противоположно, наподобявайки вертикална гилотина с два подвижни ножа [43]. В резултат на това, “работният ход” на т. А се увеличава двукратно.



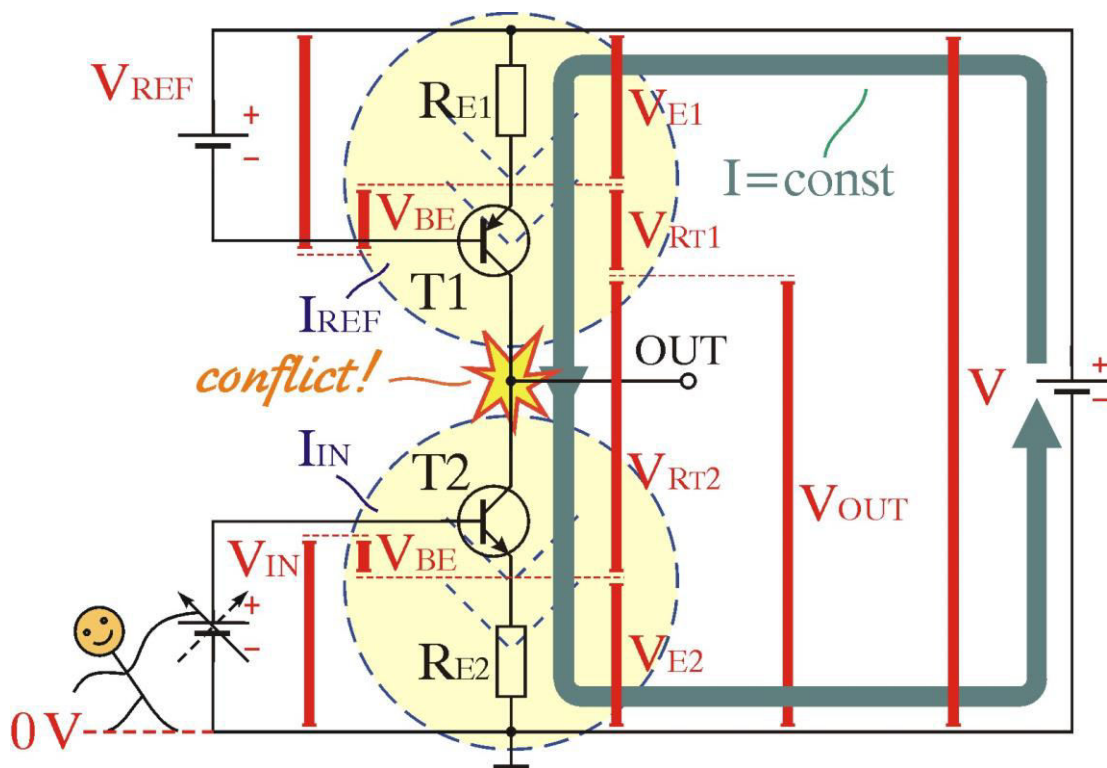
Фиг. 3.60. Геометрична интерпретация на феномена „конфликт между два променливи източника на напрежение”.

3.1.3.2. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ИЗТОЧНИЦИ НА ТОК

1. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ПРОМЕНЛИВ И ПОСТОЯНЕН ИЗТОЧНИК НА ТОК

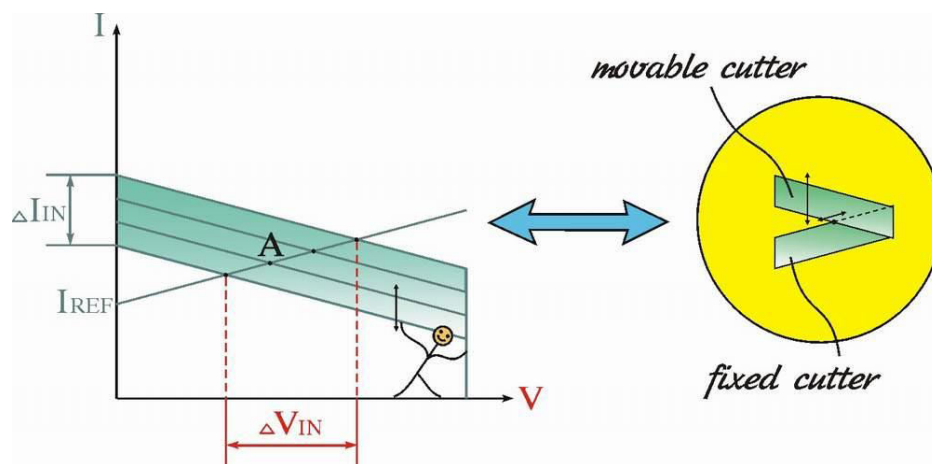
Този клас от схеми могат да бъдат представени чрез еквивалентна електрическа схема от два източника на ток (токово-стабилизиращи елементи), свързани последователно. Единият от тях (опорен) е зададал постоянен ток, а другият (входен) се опитва да го промени. Опорният източник реагира на опита за промяна и неговата напреженова реакция служи за изходен сигнал.

Схеми с динамичен товар. Например, в едно класическо усилвателно стъпало с динамичен товар (фиг. 3.61) възниква конфликт между *източници на ток*. Транзисторите T_1 и T_2 “копират” задаващите напрежения V_{REF} и V_{IN} върху постоянните резистори R_{E1} и R_{E2} , и така изпълняват функциите на източници на ток, които се “борят” помежду си. T_2 се стреми да установи входния ток I_{IN} във веригата, като за целта променя текущото си съпротивление между колектора и емитера R_{T2} в съответната посока. T_1 му се противопоставя, като мени текущото си съпротивление R_{T1} в противоположната посока, с което се опитва да поддържа старата стойност на тока I_{REF} . Този конфликт предизвиква рязка промяна на потенциала V_{out} в общата точка (изходната величина на схемата), което обуславя големия коефициент на усиление на схемата.



Фиг. 3.61. Конфликт между два източника на ток в едно усилвателно стъпало с динамичен товар.

В графичното представяне (фиг. 3.62) волт-амперната характеристика на входния източник на ток I_{IN} се движи успоредно на себе си във вертикална посока, а работната точка А се плъзга хоризонтално по неподвижната волт-амперна характеристика на втория източник I_{REF} [39]. Сега малки промени на входния ток обуславят големи промени на изходното напрежение.



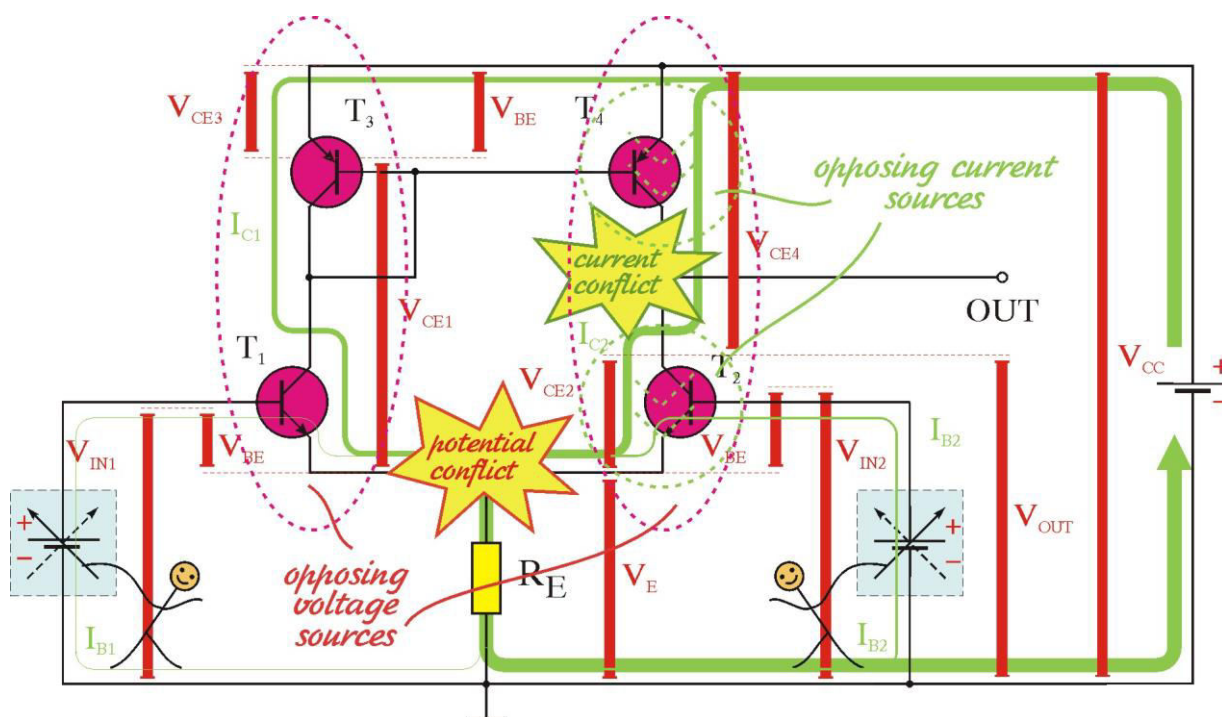
Фиг. 3.62. Геометрична интерпретация на феномена „конфликт между постоянен и променлив източник на ток”.

2. КОНФЛИКТ МЕЖДУ ДВА ПРОМЕНЛИВИ ИЗТОЧНИКА НА ТОК

Този клас от схеми пък могат да бъдат представени чрез аналогична на предишната еквивалентна електрическа схема, състояща се от два източника на ток (токово-стабилизиращи елементи), свързани последователно. Единият от тях изменя тока си в една посока, а другият – в противоположна посока. В резултат на това и двата токови източника реагират на взаимните си опити за промяна и техните напреженови реакции служат за изходен сигнал. Така конфликтът на токове става още по-драматичен, защото променяме едновременно и противоположно заданията на двата източника на ток.

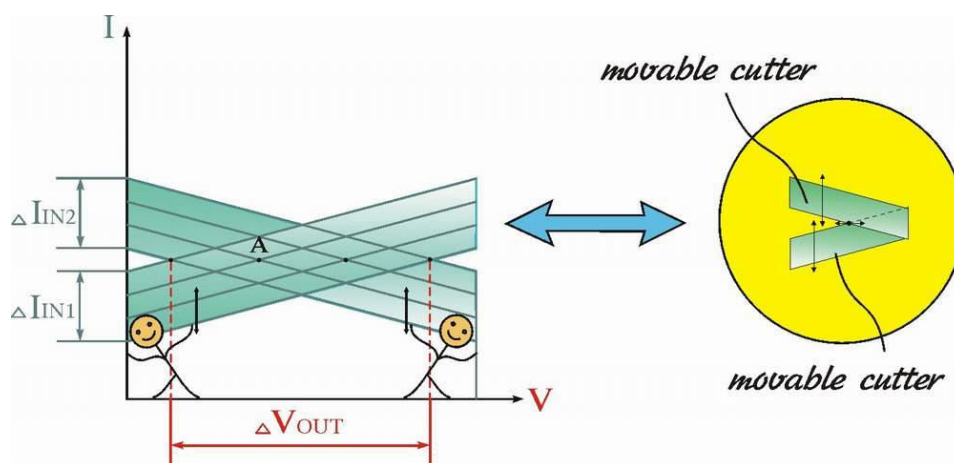
Схеми с управляван динамичен товар. Следвайки тази идея, например можем да “изобретим” схемата на *диференциалния усилвател с управляван динамичен товар* - фиг. 3.63, в която транзисторите T2 и T4 се борят “ожесточено” в стремежа си да променят общия ток в десния клон. В резултат на това потенциалът в общата им точка се изменя драматично (т.е., схемата има много голям коефициент на усилване по напрежение).

Интересното за тази схема е, че освен конфликт на токове се наблюдава и конфликт на напрежения в общата точка на емитерите. Поради изключително високия си коефициент на усилване, схемата се използва широко във входните стъпала на съвременните интегрални операционни усилватели.



Фиг. 3.63. Конфликт между два източника на ток в едно транзисторно диференциално усилвателно стъпало с динамичен товар.

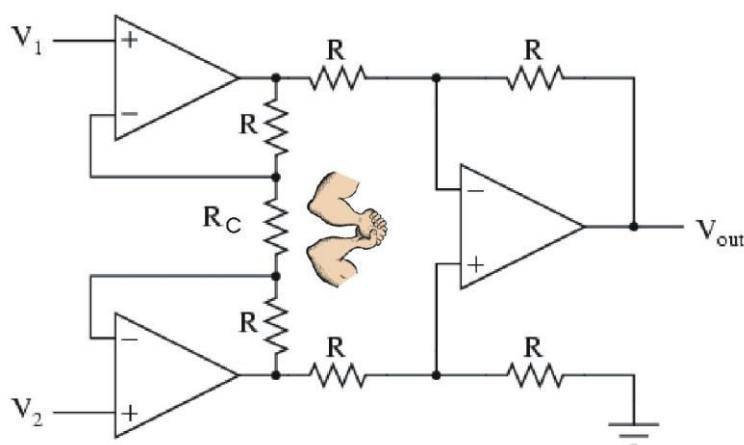
В графичното представяне (фиг. 3.64) и двете волт-амперни характеристики се движат едновременно и противоположно, наподобявайки хоризонтална гилотина с два подвижни ножа [43]. “Работният ход” на т. А отново се увеличава двукратно както при фиг. 3.60.



Фиг. 3.64. Геометрична интерпретация на феномена „конфликт между два променливи източника на ток”.

Измервателен усилвател. Тази идея може да се наблюдава и в класическата схема на един измервателен (инструментален) усилвател, реализиран с три операционни усилвателя [43]. Тя може да се представи като съставена от два повторителя, чиито изходи са свързани чрез общ резистор R_C (фиг. 3.65).

Ако входните напрежения V_1 и V_2 се изменят диференциално (т.е., едновременно и в противоположни посоки), възниква „драматичен“ конфликт между двата операционни усилвателя. Те започват да се борят като горният усилвател се стреми да увеличи/намали напрежението в средната точка вътре в общия резистор R_C , докато долният усилвател се стреми да го намали/увеличи.

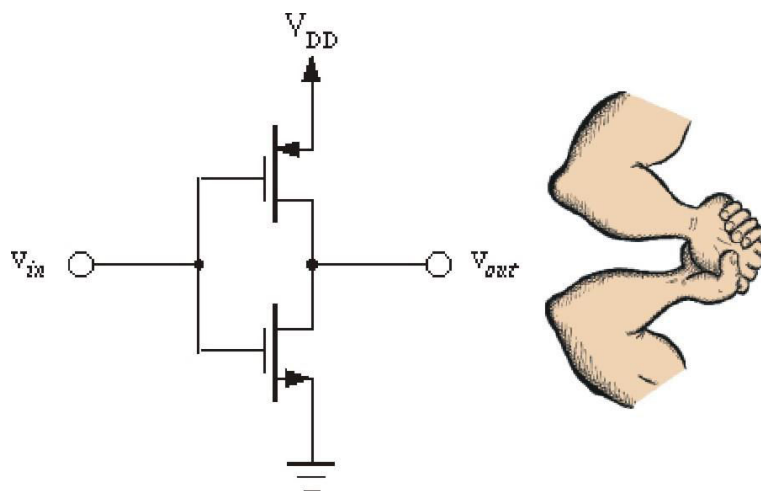


Фиг. 3.65. „Драматичен“ конфликт между два операционни усилвателя в класическата схема на един измервателен усилвател.

Двата операционни усилвателя действат с еднаква сила в конфликтната средна точка, чието напрежение остава неизменно. Реакциите на двата операционни усилвателя (техните изходни напрежения) са симетрични и пропорционални на степента на конфликта. Второто стъпало представлява обикновен диференциален усилвател, който преобразува диференциалния сигнал в единичен.

CMOS стъпало. Същата идея може да се наблюдава и в действието на CMOS схемите (фиг. 3.66). По време на прехода на входния сигнал един CMOS инвертор се държи като усилвател с много голям коефициент на усилване, което може да се обясни отново чрез принципа на „драматичния“ конфликт [43]. NMOS и PMOS транзисторите действат като управлявани с напрежение източници на ток (входното напрежение V_{IN} управлява NMOS източника на ток, докато допълнението на входното напрежение ($V_{DD} - V_{IN}$) управлява PMOS източника. Понеже двата източника на ток са свързани последователно (което е некоректно според принципите на

електротехниката), в общата точка между тях възниква „драматичен конфликт“ и изходното напрежение V_{OUT} се изменя стремително. Това обяснява изключително големия коефициент на усилване на CMOS стъпалата, поради което те често се използват в ролята на аналогови усилватели, а не като дискретни логически елементи.



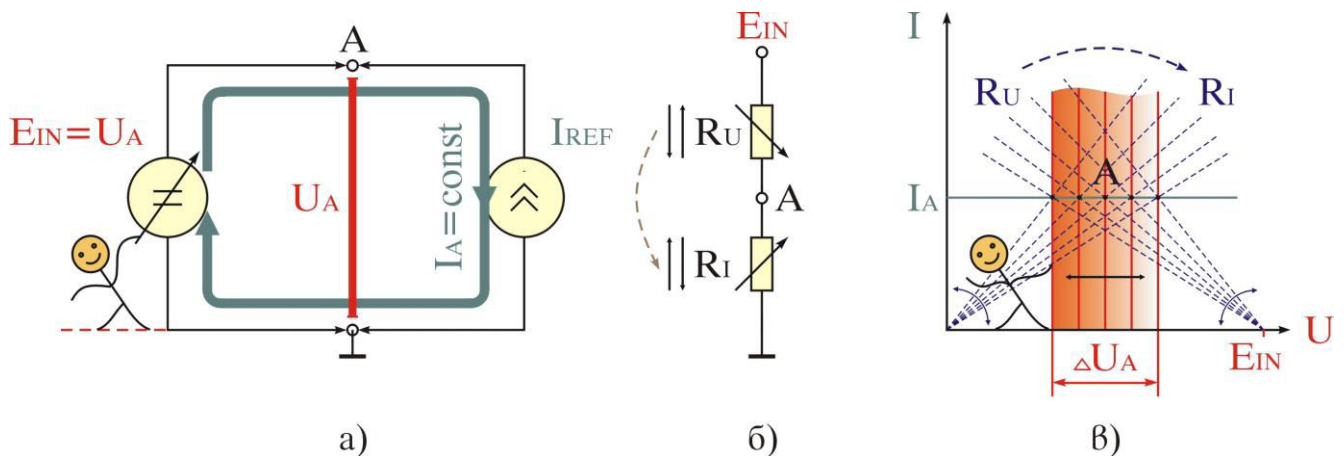
Фиг. 3.66. „Драматичен“ конфликт между NMOS и PMOS транзисторите в една CMOS схема.

3.1.3.3. ВЗАИМОПОМОЩ МЕЖДУ РАЗНОРОДНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ИЗТОЧНИЦИ

Освен конфликт, в електронните схеми може да се наблюдава и взаимно подпомагане между електрически източници. Така например, последователно свързаните източници на напрежение и паралелно свързаните източници на ток си “помагат” в стремежа да установят определено напрежение и ток върху един общ товар (при съпосочно свързване). Много по-интересни обаче са случаите, в които разноименни електрически източници си “помагат”. Съществуват два класа от тези уникални електронни схеми.

1. ИЗТОЧНИК НА ТОК ПОДПОМАГА ИЗТОЧНИК НА НАПРЕЖЕНИЕ

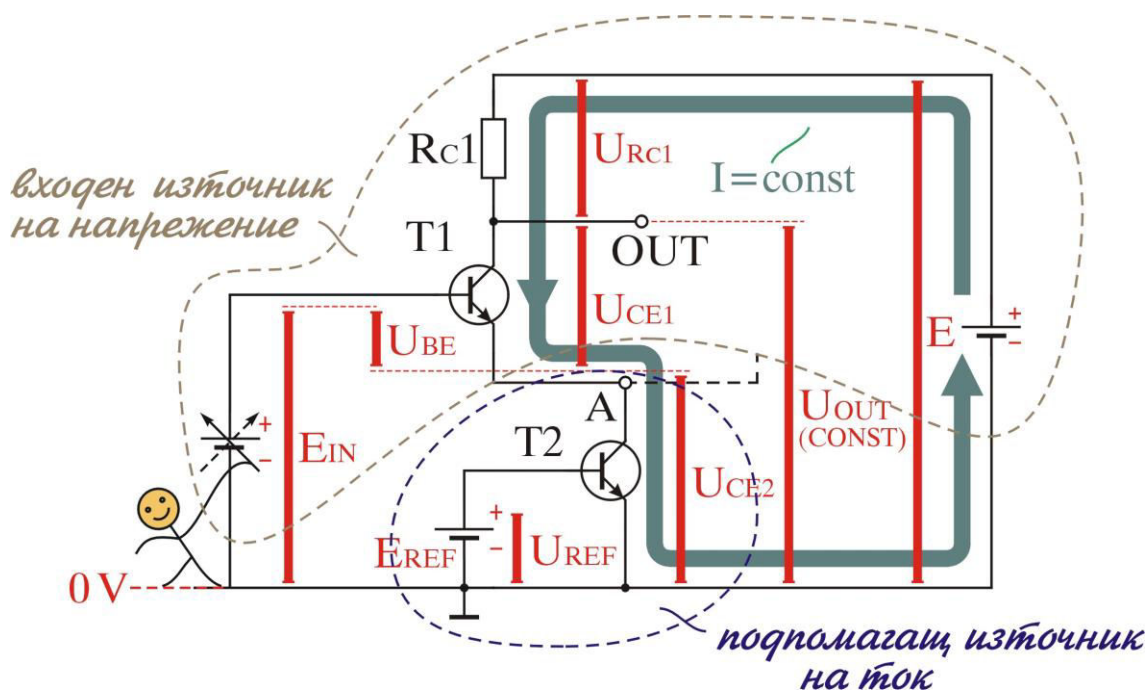
Един източник на напрежение се “чувства” най-комфортно, когато работи на празен ход. Интересно е какво ще стане обаче, ако бъде “натоварен” с един малко необичаен консуматор - източник на ток (фиг. 3.67а).



Фиг. 3.67. Източник на ток подпомага източник на напрежение.

Източникът на напрежение е реализиран чрез напреженово-стабилизиращ двуполусник с вътрешно съпротивление R_U , а източникът на ток – с токово-стабилизиращ двуполусник с вътрешно съпротивление R_I (фиг. 3.67б). Тези два нелинейни “резистора” образуват делител на напрежение с коефициент на предаване $1 + R_I/R_U$. За да измени потенциала на общата тока A , източникът на входно напрежение започва да променя текущата стойност на вътрешното си съпротивление R_U в съответната посока (намалява го, за да увеличи напрежението или го увеличава за да намали напрежението). Източникът на ток реагира на това, като променя текущата стойност на вътрешното си съпротивление R_I в противоположна посока (увеличава го, за да намали тока или го намалява за да увеличи тока) и така подпомага източника на напрежение (фиг. 3.67в). Получава се така, че и двата резистора на делителя R_U - R_I едновременно променят текущото си съпротивление в името на една обща цел - промяната на потенциала U_A .

Този уникален феномен можем да се наблюдава в популярната схема на един диференциален усилвател (фиг. 3.68) при синфазна промяна на входните напрежения (при диференциална промяна действа *принципът на конфликта*). В този случай лявата и дясна част на схемата действат по един и същи начин (това също е елементарна форма на “подпомагане”, при която два паралелно свързани източника на напрежение се опитват с общи усилия да променят потенциала на общата точка А). Нас обаче ни интересува взаимодействието на горната част (нека за простота да се ограничим само с лявата половина) и долната част на схемата. Те представляват съответно източник на напрежение (емитерен повторител, реализиран с транзистора T_1) и източник на ток (схема *общ емитер*, реализирана с транзистора T_2).

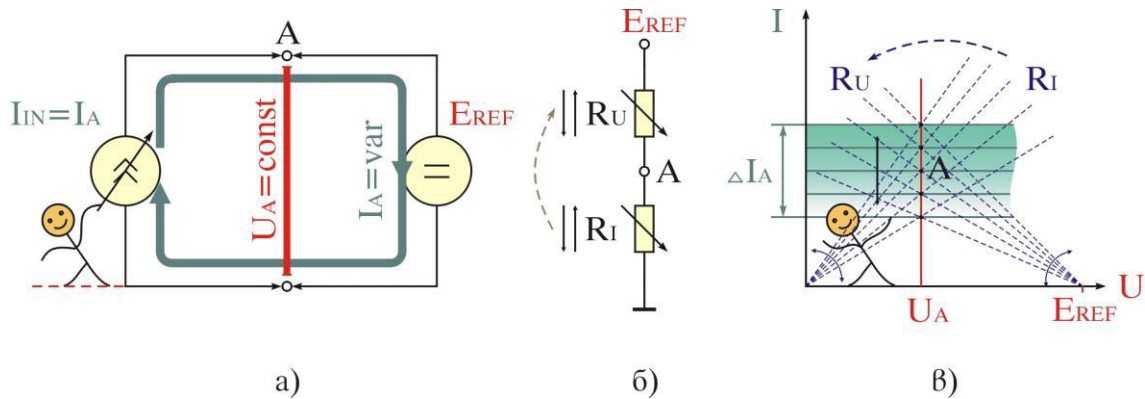


Фиг. 3.68. В схемата на един диференциален усилвател при синфазна промяна на входните напрежения транзисторът T_2 подпомага T_1 .

В тази конкретна схема, транзисторът T_1 се стреми да промени потенциала на т. А като мени текущото си съпротивление между колектора и емитера. Транзисторът T_2 му “помага” като променя текущото си съпротивление в обратната посока. В резултат на това токът, протичащ през резистора R_{C1} и изходното напрежение U_{OUT} , не се изменят - основно свойство на диференциалния усилвател при синфазни входни сигнали.

2. ИЗТОЧНИК НА НАПРЕЖЕНИЕ ПОДПОМАГА ИЗТОЧНИК НА ТОК

Източникът на ток работи най-добре, когато изходът му е даден “накъсо”. Интерес представлява ситуацията, когато бъде натоварен с един източник на напрежение - (фиг. 3.69а).

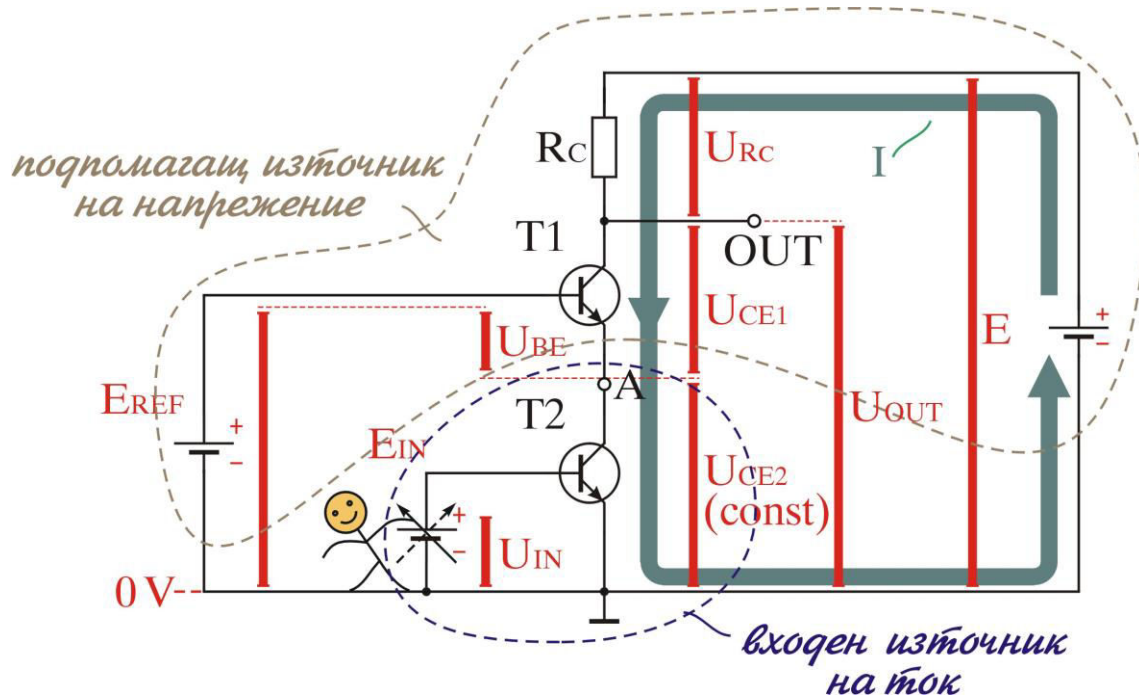


Фиг. 3.69. Източник на напрежение подпомага източник на ток.

Действието на схемата може да се разбере, като се разгледа еквивалентната схема от два последователно свързани “резистора” с вътрешно съпротивление R_U и R_I - фиг. 3.69б. За да измени общия ток I_A , източникът на входен ток започва да променя текущата стойност на вътрешното си съпротивление R_I в съответната посока. Източникът на напрежение реагира на това като променя текущата стойност на вътрешното си съпротивление R_I в същата посока и така подпомага източника на ток - фиг. 3.69в. Получава се така, че и двата последователно свързани “резистора” едновременно менят текущото си съпротивление в името на една обща цел - промяната на тока I_A .

Този уникален феномен можем да се наблюдаваме в действието на интересните схеми, наричани *касходи* (фиг. 3.70). Това е добре познатият източник на напрежение (емитерен повторител, реализиран с транзистора T_1), “натоварен” с източник на ток (схема общ емитер, реализирана с транзистора T_2). Сега обаче токът се явява входна величина, а напрежението на общата точка А е фиксирано.

За да промени тока I , транзисторът T_2 започва да изменя текущото си съпротивление между колектора и емитера. Транзисторът T_1 обаче си е поставил задачата да поддържа неизменен потенциала на емитера си и затова променя текущото си съпротивление в същата посока, с което “помага” на транзистора T_2 . Последният остава с фиксиран колекторен потенциал, което елиминира ефекта на Милър (умножаване на паразитния капацитет C_{CB}) [28].



Фиг. 3.70. В класическата каскодна схема един емитерен повторител (транзисторът T_1) подпомага един източник на ток (транзистора T_2)

3.1.4. ДРУГИ ПРИНЦИПИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ

Освен разгледаните по-горе са разработени още принципи, но ограниченият обем на дисертационния труд не позволява да бъдат описани. За да се добие известна представа за тях, по-долу е поместен йерархичен списък на по-главните групи от тях.

1. Принципи за изграждане на пасивни схеми

- Преобразуване на информация чрез пасивни схеми (принципи за изграждане на резистивни, мемристивни, капацитивни и индуктивни преобразуватели)
- Пасивна компенсация

2. Принципи за изграждане на схеми без обратна връзка

- Регулиране на енергия чрез активни елементи (електронни схеми без обратна връзка)

3. Принципи за изграждане на схеми с отрицателна обратна връзка

- Активно копиране (системи с ООВ в условия без смущение): последователен и паралелен принцип
- Получаване на усилване чрез затихване (системи с ООВ в условия със смущение)
- Използване на смущението като входен сигнал (системи с ООВ в условия на вариращо смущение)
- Реверсиране (обръщане причина-следствие)

4. Принципи за изграждане на схеми с положителна обратна връзка

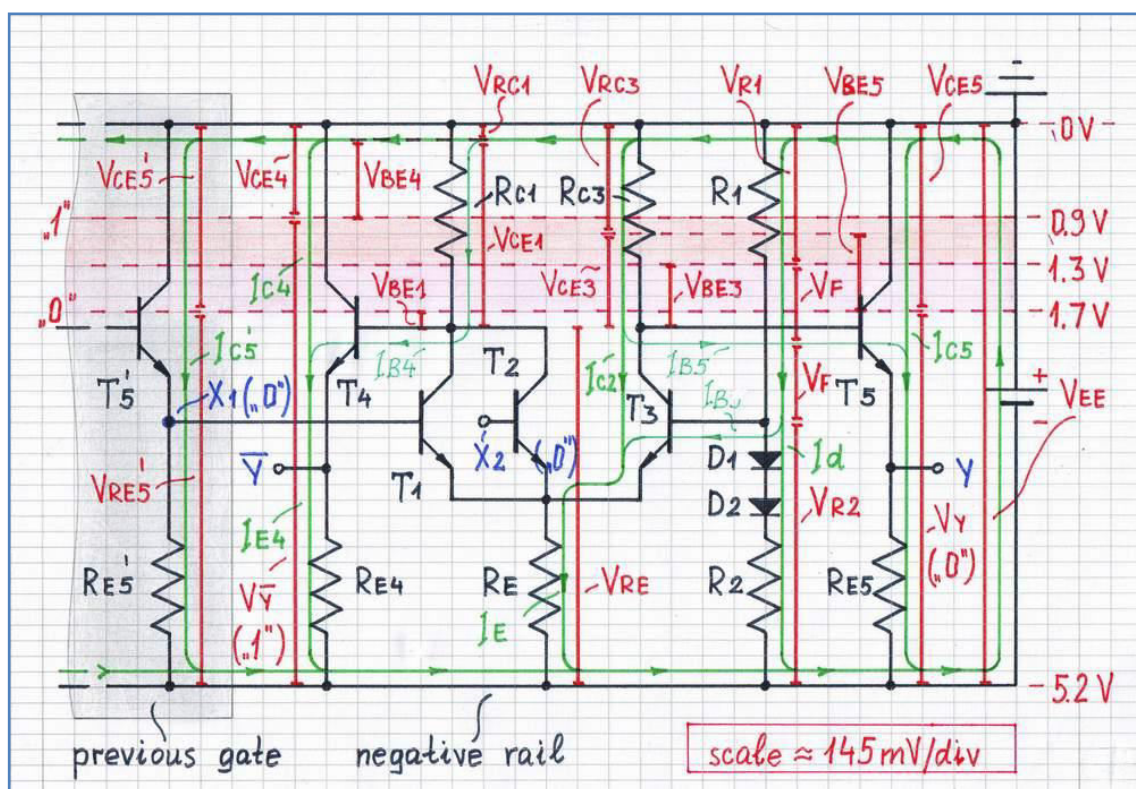
5. Принципи за изграждане на схеми с комбинирана обратна връзка и др.

3.2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЕВРИСТИЧНИ МЕТОДИ ЗА ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ВЕЛИЧИНИ В ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

За да може да се оперира естествено с абстрактните електрически величини *напрежение*, *ток* и *съпротивление*, те могат да бъдат визуализирани чрез аналогични на тях пространствени, геометрични величини. За целта може да се използват класическите аналогии на електрическия потенциал (напрежение) и електрическият ток - воден стълб с височина, пропорционална на стойността му и флуид, течащ в затворен кръг. С тяхна помощ, потенциалите и напреженията в една схема може да се представят геометрично - чрез вертикални отсечки (стълбчета) с дължини, пропорционални на тяхната стойност", а токовете – чрез контури (фиг. 3.71). Така „височинната" представа за електрическите величини *потенциал* и *напрежение* позволява да се строят ефектни потенциални "стълбчета" и диаграми, а "флуидната" представа за електрическия ток - да се изгражда картина на токовете в изследваните схеми. Аналогично, съпротивленията може да се представят чрез отсечки с пропорционална на стойността им дължина.

3.2.1. ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЯ

3.2.1.1. ПОТЕНЦИАЛНИ СТЬЛБЧЕТА



Фиг. 3.71. Картина на потенциалите и токовете в една ECL схема [40], представена чрез напрежителни стълбчета и токови контури.

Методът на потенциалните стълбчета е един геометричен начин за визуализиране на невидимите електрически напрежения и падове в схемата, при който те се представят чрез отсечки (стълбчета), височината на които е пропорционална на представяното напрежение.

Тези стълбчета могат да представят напрежителни падове и напрежения спрямо отрицателния полюс, маса, положителния полюс или плаващи (незаземени) напрежения. Така някои от тях са “привързани” твърдо към “масата” (V_{RE} , V_{R2} на фиг. 3.71) или към захранването (V_{R1} , V_{CE5}), а други са “плаващи” (V_{BE1} , V_{CE3}). Количествено съответствието между представяното напрежение и дължината на представящата го отсечка се дава от мащабен коефициент с дименсия [V/cm].

Разработени са няколко варианта на оформление на потенциалните стълбчета: отсечки без знак, отсечки с нанесени знаци на полярността и с формата на стрелка, която показва полярността на напрежението (острието – плюс, а основата – минус). Нулевото напрежително ниво и другите характерни нива (например, шините на захранването - отрицателна и положителна) се обозначават с хоризонтални пунктирани линии. За да може да се сравняват, съответните стълбчета се свързват с хоризонтални пунктирани линии. Съответно на логиката на човешкото мислене, отсечките, нанесени над нулевата линия (масата) са положителни, а под нея – отрицателни. Съвкупността от тези отсечки дава потенциалния релеф на схемата.

За да се различават лесно визуализираните електрически величини върху черно-бялото изображение на принципните схеми, те се изобразяват цветни - потенциалните в червено (топъл цвят – асоциация с налягане), токовете - в зелено (асоциация с воден поток), а съпротивителните - в сиво (асоциация с въгленов слой).

Възможно е и тримерно представяне на потенциалния релеф, като за целта схемата е начертана аксонометрично легнала (в проекция) и потенциалните стълбчета са перпендикулярни на нея (вертикални). Представяния с потенциални стълбчета могат да бъдат анимирани (Flash анимация – непрекъсната или в постъпков режим).

Какво всъщност представят потенциалните стълбчета? Това фактически е една застинала снимка, нещо като изображение върху екрана на осцилоскоп без хоризонтална развивка (ако няма хоризонтална развивка, върху екрана се очертава точно отсечка, дължината на която е пропорционална на представяното напрежение). Възниква въпросът: „Не е ли по-добре да се изобразят осцилограми на напреженията в контролираните точки, а не стълбчета?”

Предимството на стълбчетата е, че се показва съотношението между напреженията. Стълбчетата може да се наслагват във височина (да се сумират) така че, съгласно II закон на Кирхоф, в един затворен контур сумата от всички стълбчета е равна на най-голямото стълбче – приложеното захранващо напрежение. Ако са осцилограми, трябва да се сложат моменти на времето, защото осцилограмата показва в рамките на един период моментните стойности във

всяка една точка от времето. Визуализирането с осцилограми има предимството, че е необходима само една схема, докато тук трябва да се чертаят повече схеми за различни типични стойности на напреженията, но пък добре си проличават съотношенията между напреженията. Едно сравнение е следното: изображенията с потенциални стълбчета са като снимки (статични кадри) на отделните моменти от действието на схемата, докато осцилограмите са като филми, в които има всички кадри.

Каква е ползата от представянето с потенциални стълбчета? То дава една много добра обща представа за действието на схемата. С един поглед върху една такава схема с наложена картина на потенциалите се добива представа за съотношенията на потенциалите в отделните точки. Това е предимство спрямо цифровия начин на представяне, който е точен, но абстрактен.

Едно приложение (идея) на този начин за визуализиране на потенциалите би могло да бъде в симулационните програми като атрактивна форма за извеждане на резултатите от симулацията.

3.2.1.2. ПОТЕНЦИАЛНИ ДИАГРАМИ

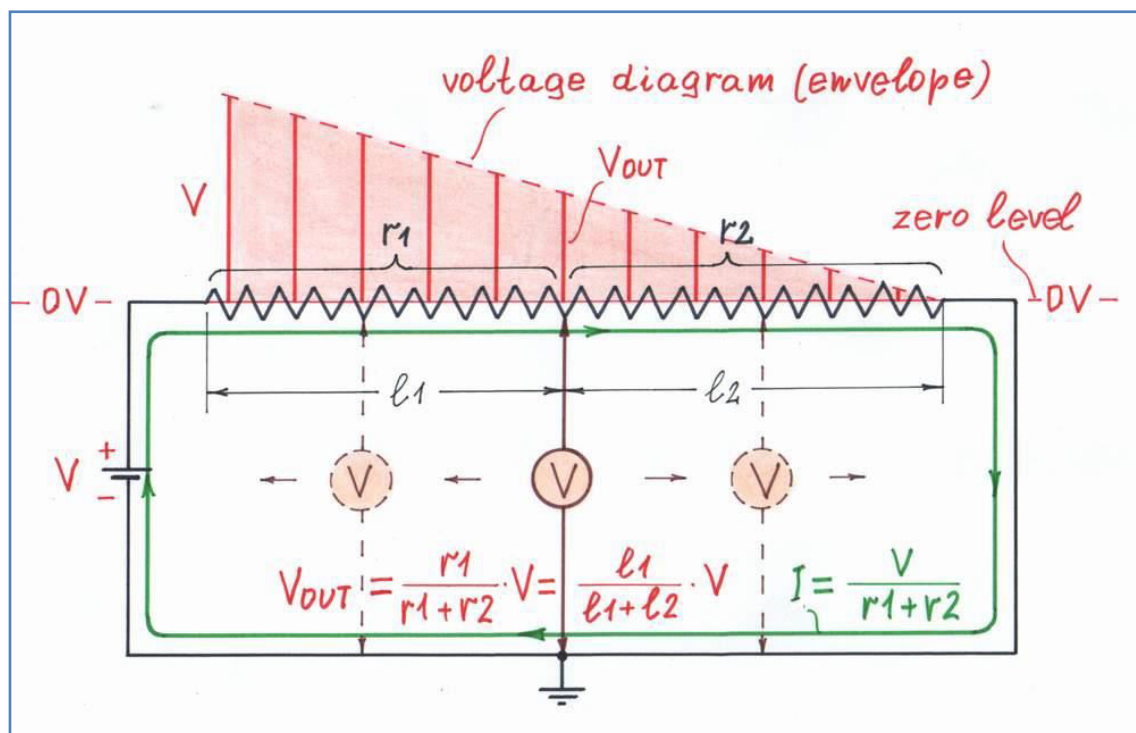
Ако се “влезе” вътре в един резистор и се визуализират потенциалите по протежение на резистивния слой с поредица от “стълбчета”, се получава потенциалната му диаграма (фиг. 3.72). По-удобно е да се изобрази само обвивката на диаграмата, където по вертикалата се нанася потенциала V , по хоризонталата - съпротивлението R , а ъгълът дава силата на тока I .

Потенциалната диаграма е едно по-нататъшно развитие на представянето с потенциални стълбчета. Потенциалните стълбчета са едномерен начин за представяне на напреженията, а потенциалната диаграма е двумерен начин. Всъщност една потенциална диаграма представлява съвкупност от потенциални стълбчета.

Като се представя геометрически съпротивлението R чрез отсечка се смята, че то е линейно разпределено по дължината на резистора (т.е., резисторът се представя като линейния проводник в експеримента на Ом). Тогава дължината L на резистора (отсечката) е пропорционална на съпротивлението му R . В повечето случаи това представяне е изкуствено, защото обикновените резистори в електронните схеми са дискретни, но то позволява да се онагледят ефектно действието на схемите с потенциални диаграми. Нещо повече - в много случаи може направо да се определят и количествени параметри (коефициенти на предаване и др.)

Каква е разликата между потенциална диаграма и осцилограма на потенциалите в дадена точка на схемата? Разликата е съществена, няма нищо общо между тях. Потенциалната диаграма показва разпределението на потенциалите по дължината на един съпротивителен слой, т.е. какви са стойностите на потенциалите вътре в един резистор като той се разглежда не като точка, а като линия (във всяка една точка на тази линия, през определена стъпка, се

построява отсечка, перпендикулярна на линията, с височина, пропорционална на потенциала в дадената точка). Една осцилограма представлява съвкупност от точки, които изразяват стойностите на потенциала в отделни моменти на времето чрез вертикалното си отместване.



Фиг. 3.72. Картина на потенциалите по протежение на един резистивен слой, представена чрез потенциална диаграма.

Отсечките на една потенциална диаграма изразяват стойностите на напреженията в отделните точки на резистивния слой в един и същи момент на времето, а осцилограмата отразява стойностите на напрежението в една точка, но в различни моменти на времето.

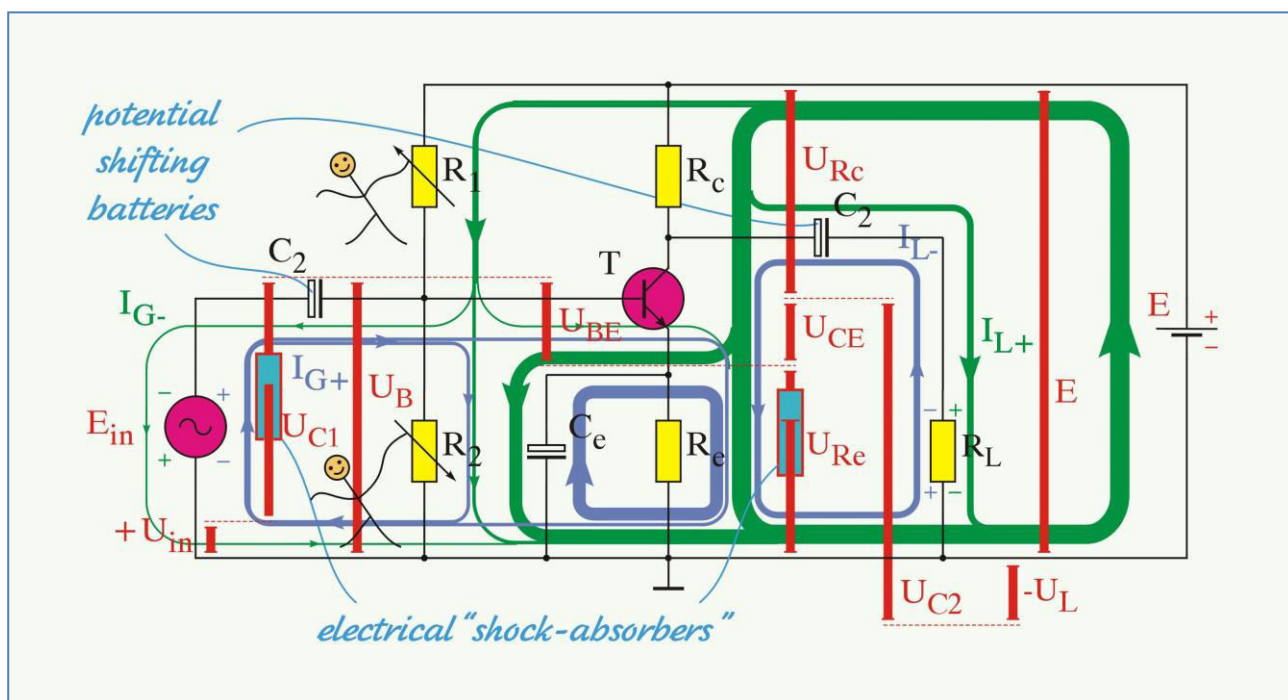
Сравнение между потенциални стълбчета и потенциална диаграма. Потенциалните стълбчета може да се използват за представяне на напреженията на кондензатори и индуктивности докато една потенциална диаграма представя падовете само върху съпротивителни слоеве. Тя е пространствен начин за представяне на напрежения.

Тримерна потенциална диаграма. Следващото развитие е тримерното представяне – когато трябва да се представят потенциалите във всяка една точка на съпротивителен слой под формата на равнина.

Анимирана потенциална диаграма. Потенциалните диаграми може да се анимират. Пример за това е интерактивният строител на електронни схеми с паралелна отрицателна обратна връзка, реализиран като Flash филм [45, 46, 47, 48].

3.2.2. ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА ТОКОВЕ ЧРЕЗ ТОКОВИ КОНТУРИ

Вместо стандартното означаване на токовете в схемите - малки стрелки, ориентирани най-често в произволна посока, в това представяне се използват пълни токови контури. Всеки един ток се представя със затворена насочена линия (стрелка), която започва от положителния полюс на източника и завършва до отрицателния му полюс. Дебелината на контура е пропорционална на силата на тока, а стрелките, нанесени върху него, показват посоката на тока – фиг. 3.73. Съвкупността от всички токови контури дава токовата картина на схемата.

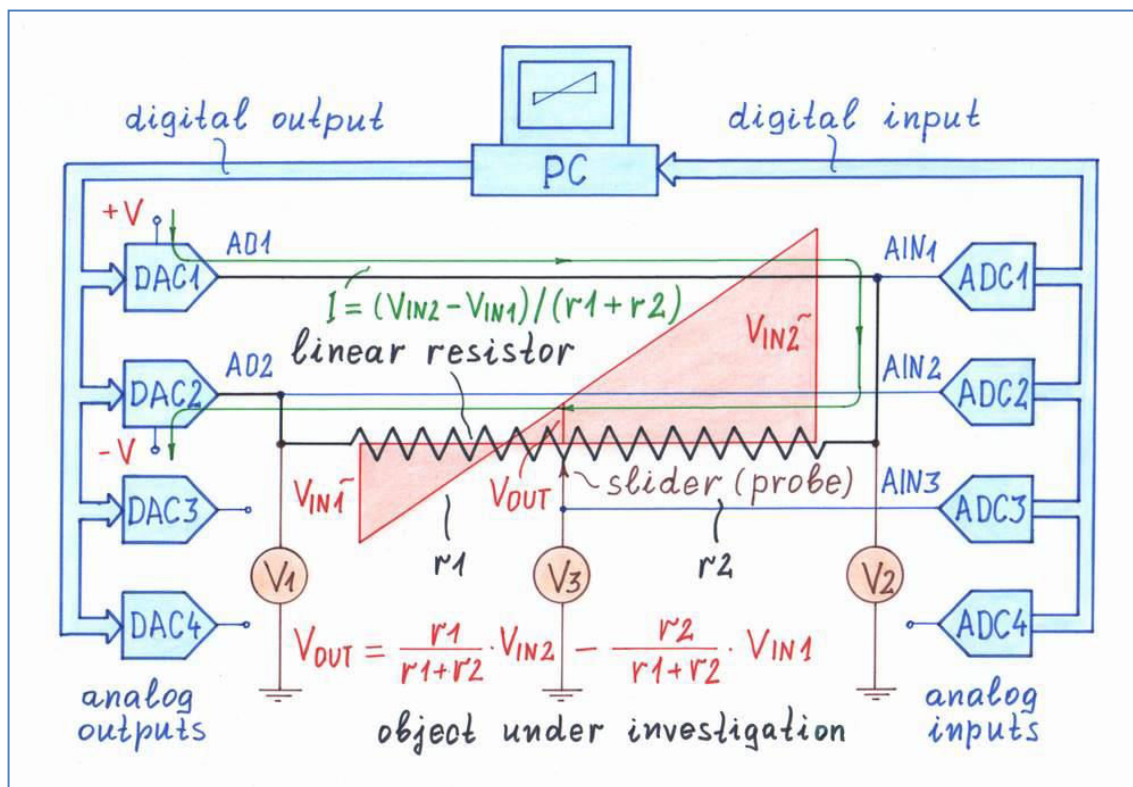


Фиг. 3.73. Картина на токовете в транзисторно усилвателно стъпало с последователна отрицателна обратна връзка по ток (дебелината на токовите контури е пропорционална на силата на тока).

3.2.3. ПРЕДСТАВЯНЕ НА ДЕЙСТВИЕТО НА СХЕМИТЕ ЧРЕЗ НАСЛАГВАНЕ НА МНОЖЕСТВО КАРТИНИ НА ПОТЕНЦИАЛИТЕ И ТОКОВЕТЕ.

Обикновено действието на схемите се състои от няколко етапа (състояния, стъпки, фази). Пример за това е емитерно-свързаната логическа схема [40], която има пет различни състояния за различните стойности на входното напрежение: под логическата нула, [логическа нула](#), [преход](#), [логическа единица](#), над логическата единица. За всяко едно състояние на схемата се прави отделна картина на напреженията и токовете. Така се получава съвкупност от слайдове, които след това се наслагват последователно (превключват) върху изображението на една и съща схема.

3.2.4. ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЯТА И ТОКОВЕТЕ В ОН-ЛАЙН РЕЖИМ

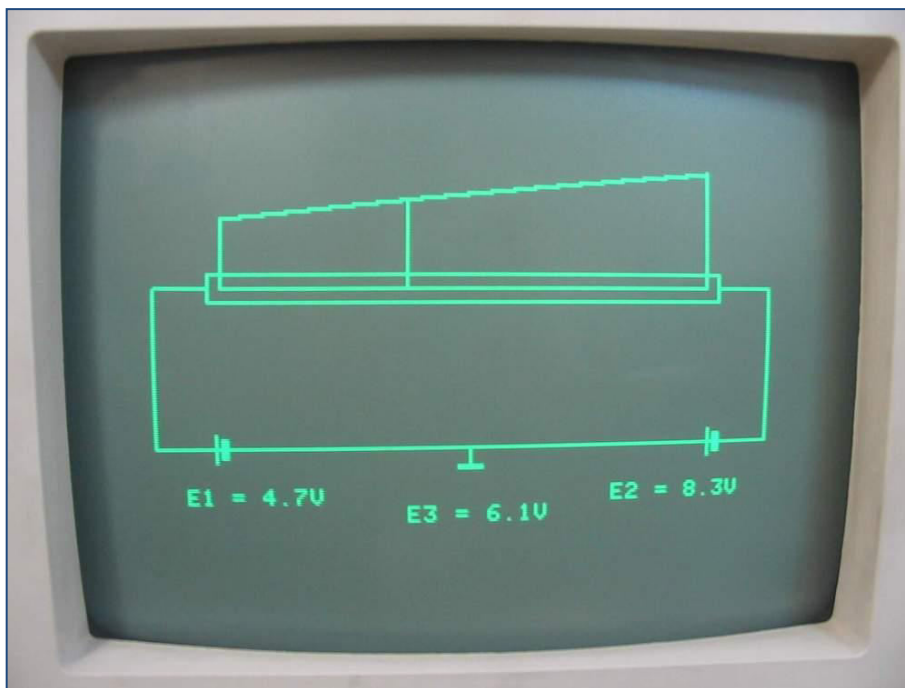


Фиг. 3.74. Компютъризирана постановка за визуализиране на картината на потенциалите и токовете на един резистивен суматор в on-line режим

В настоящата работа са реализирани on-line интерактивни потенциални стълбчета, диаграми и токови контури. За целта, с помощта на подходяща аналогово-цифрова периферия, към изследвания обект е свързан персонален компютър (във всяка наблюдавана точка е свързан аналогов вход). Под управление на съответното програмно осигуряване, върху екрана на монитора се изобразява картината на потенциалите, която реагира адекватно на промените в изследваната схема [49]. Измерват се ключови напрежения и токове, а останалите се изчисляват. Например, в показаната на фиг. 3.74 постановка за изследване на един резистивен суматор, се измерват само три напрежения – в краищата (V_{IN1} и V_{IN2}) и напрежението на плъзгача на потенциометъра (V_{OUT}), които отразяват моментното състояние на потенциалите в тези точки на изследваната схема). Интересното е, че останалите междинни точки, формиращи обвивката на потенциалната диаграма, се изчисляват.

На фиг. 3.75 е показано реалното изображение върху екрана на монитора, получено в резултат на действието на програмата ЖИВА ПОТЕНЦИАЛНА ДИАГРАМА. В това моментно състояние, от лявата страна на потенциометъра, е подадено напрежение $E1 = 4,7V$, от дясната страна – $E2 = 8,3V$, и е отчетено изходно напрежение $E3 = 6,1V$. Тази геометрична

интерпретация прави много добра асоциация с известната задача от средното образование „отсечка, успоредна на основите на трапец” и илюстрира чудесно принципа на суперпозицията в електротехниката. От изображението направо се прави заключение, че изследваната схема представлява един суматор на напрежения (в случая положителни) с тегловни коефициенти.

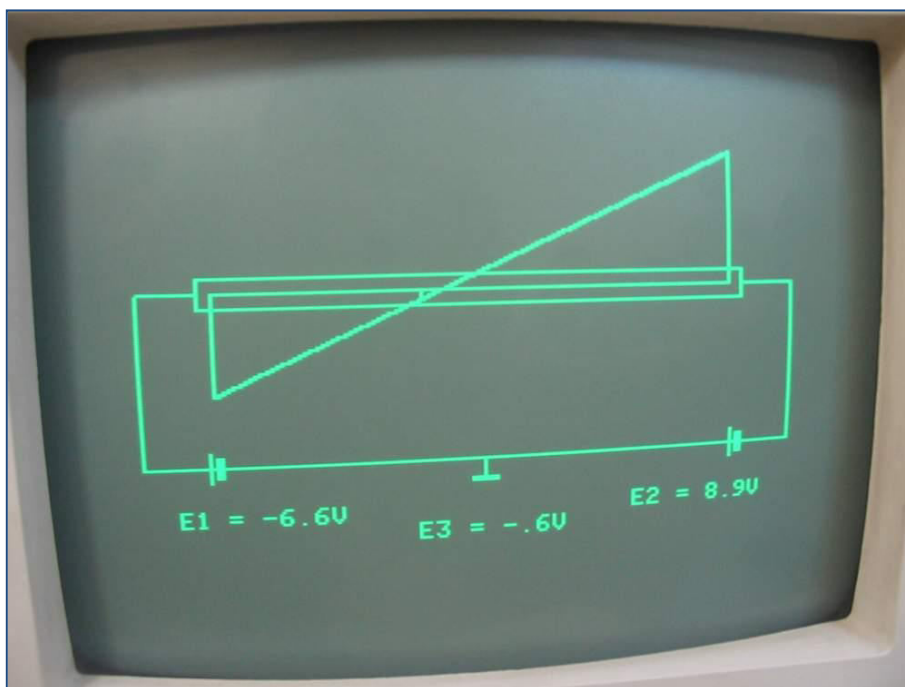


Фиг. 3.75. Изображение върху екрана на монитора, получено в резултат от действието на програмата ЖИВА ПОТЕНЦИАЛНА ДИАГРАМА, под управлението на която се изследва резистивен суматор в on-line режим.

Когато двете напрежения станат разнополярни, някъде на резистивния слой се появява „вълшебната” точка с нулев потенциал (виртуална маса) – фиг. 3.76. Геометричната интерпретация отново дава изключително прост и нагледен начин за осъзнаване на действието на схемата и дори за определяне на точните количествени стойности. Сега асоциацията е „подобни триъгълници”, което дава прочутото съотношение $E1/E1 = -R1/R2$.

Ако сега двете напрежения се изменят едновременно с една и съща „скорост”, но в различна посока, виртуалната маса ще стои неподвижна. Това всъщност е една ефективна демонстрация на действието на инвертиращия усилвател.

Потенциални стълбчета може да се визуализират и директно върху реалните схеми с помощта на уреди, които имат линейна по форма скала (например, светодиоден индикатор от типа „светеща лента”). За целта е най-добре те да се монтират вертикално в контролираните точки на платката с изследваната схема.



Фиг. 3.76. Когато двете входни напрежения станат разнополярни, някъде на резистивния слой се появява „вълшебната“ точка с нулев потенциал (виртуална маса). Асоциацията е „подобни триъгълници“.

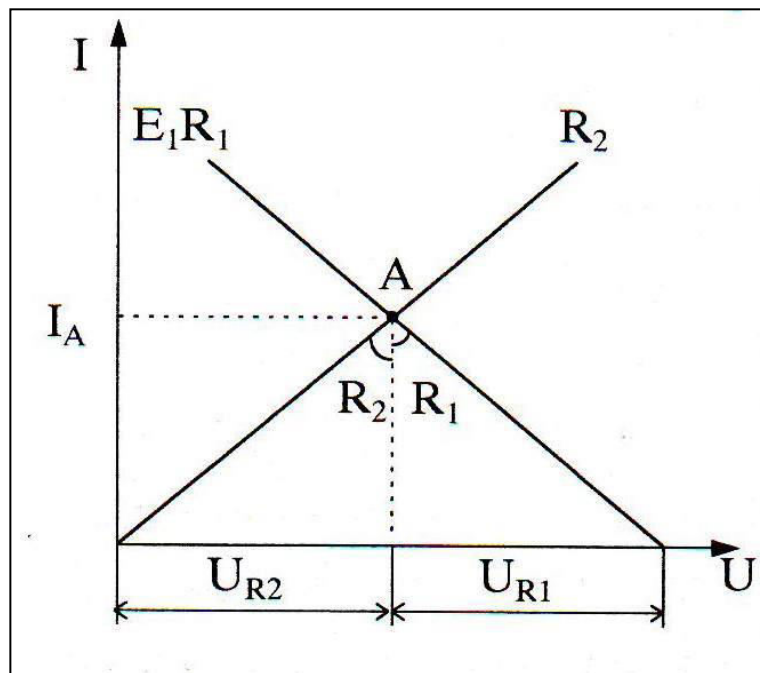
3.2.5. ВИЗУАЛИЗИРАНЕ НА РАБОТНАТА ТОЧКА ЧРЕЗ НАСЛОЖЕНИ ВОЛТ-АМПЕРНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ГРАФОАНАЛИТИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ)

Всяка една електрическа верига можем да се сведе до два, включени един към друг двуполусника - източник и товар. Всеки от тях се характеризира с волт-амперната си характеристика, която представя всички възможни комбинации от стойности на напрежението V и тока I . В определен момент на времето обаче действа само една от възможните комбинации и тя определя положението на само една точка A от графиката - *работната точка* на веригата. Понеже напрежението и токът са едни и същи за двата елемента, работната точка се получава от пресичането на волт-амперните им характеристики, начертани в една обща координатна система. Това представяне позволява да се илюстрира режима (работната точка) на схемата.

Така например, делителят на напрежение, изграден от два резистора R_1 и R_2 , може да се представи по този графичен начин чрез наслагване на две волт-амперни характеристики – на резистора R_2 и на един реален източник на напрежение със съставна характеристика $E_1 R_1$ (фиг. 3.77). Пресечната точка A определя тока, протичащ през делителя I_A и изходното му напрежение V_A .

В процеса на действието на схемата някой от двата елемента си променя величината (за горния пример това може да бъде напрежението или някое от съпротивленията). В резултат на това, неговата волт-амперна характеристика започва да се движи, а работната точка се плъзга

по другата характеристика. Така подвижната характеристика сканира неподвижната (подвижната е *сканираща*, а неподвижната – *сканирана*).

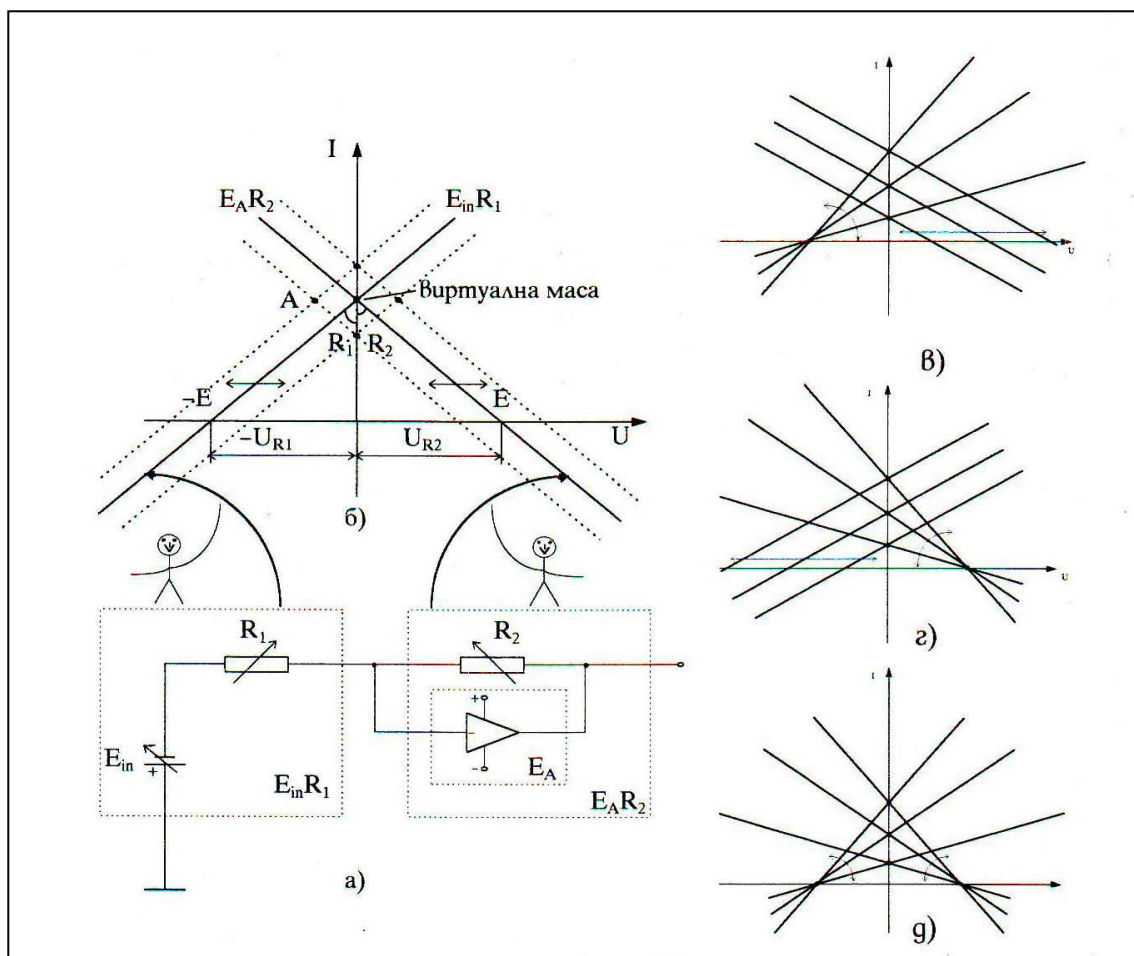


Фиг. 3.77. Графоаналитично представяне на делител на напрежение, изграден от два последователно свързани резистора R_1 и R_2 .

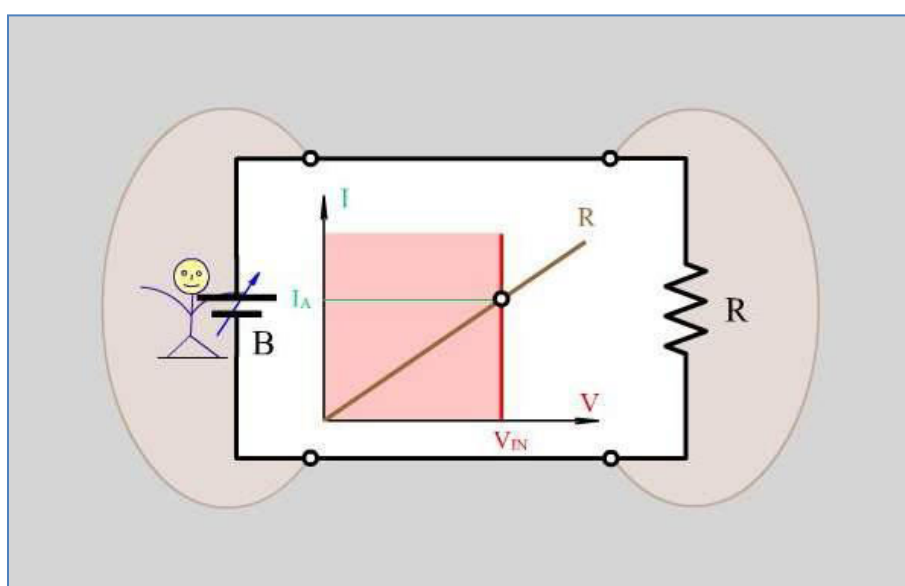
В примера на фиг. 3.77, ако се мени напрежението на източника, волт-амперната му характеристика $E_1 R_1$ се премества успоредна сама на себе си (извършва трансляция); ако се променя съпротивлението R_1 или R_2 , волт-амперната му характеристика се върти около началото на координатната система.

Един по-сложен пример – класическата схема на инвертиращ усилвател, е показан на фиг. 3.78 при три случая: променя се R_1 (в), променя се R_2 (г), променят се и двете едновременно и едновременно (д). И в трите случая операционният усилвател (докато не е стигнал зоната на насищането) успешно се справя с основната си задача – да поддържа нулево напрежение (виртуална маса) на инвертиращия си вход. За целта той мени изходното си напрежение в съответната посока и мести волт-амперната характеристика на резистора R_2 .

Аналогично на метода на интерактивната on-line потенциална диаграма (фиг. 3.74) и графоаналитичната интерпретация може да бъде „оживена” върху екрана чрез компютър, свързан с подходящ интерфейс към изследваната схема (фиг. 3.79) [44 - page P5-5].



Фиг. 3.78. Графоаналитично представяне на инвертиращ усилвател, реализиран с операционен усилвател и два резистора R_1 и R_2 .



Фиг. 3.79. „Жива” графоаналитична интерпретация върху екрана.

3.3. РАЗРАБОТВАНЕ НА МИСЛОВНИ СРЕДСТВА ЗА РАЗБИРАНЕ НА ДЕЙСТВИЕТО НА ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

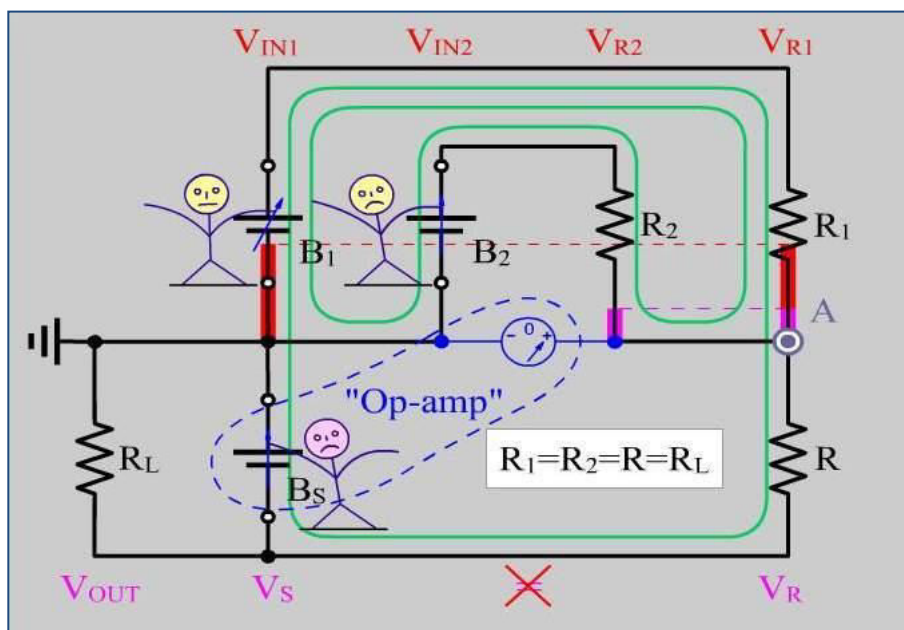
3.3.1. РАЗКРИВАНЕ И УМИШЛЕНО ВЪВЕЖДАНЕ НА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕНИ ВРЪЗКИ В ДЕЙСТВИЕТО НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ СХЕМИ

Класическият подход разглежда активните елементи като пропорционални, безинерционни устройства, на които входната и изходна величина се изменят едновременно. Например, смята се, че колекторният ток на един транзистор се изменя едновременно с базовия му ток, изходното напрежение на един операционен усилвател се изменя едновременно с входното му напрежение и т.н. Разглеждано по този начин, действието на устройствата трудно може да бъде разбрано, защото не се вижда причинно-следствената връзка между входните и изходни величини. Според човешките представи, всяко едно явление в природата е следствие от някаква причина. Така че, за да се разбере действието на електронните устройства, трябва да се виждат, а когато ги няма - да се въвеждат изкуствено *причинно-следствени връзки* в изследваните явления.

Причината закъснява, макар и за миг, спрямо следствието (първо се появява причината - входният сигнал, а след това се изменя следствието - изходният сигнал). Следователно, за да се въведат причинно-следствени връзки в безинерционните, пропорционални електронни устройства, те трябва умишлено да се направят бавни, инерционни, интегрални. Като се забави многократно действието на изследваните устройства, то става съизмеримо със скоростта на човешкото мислене и позволява да се “надникне” в преходния процес, където е скрита ценна информация за действието на схемата.

3.3.2. ПОСТАВЯНЕ НА МЯСТОТО НА АНАЛИЗИРАНОТО УСТРОЙСТВО (ЕМПАТИЯ)

За да се реализира този похват човекът се поставя мислено на мястото на изследваните електронни устройства, отъждествява се с тях (това всъщност е известният от синектиката похват *емпатия*). За целта активните елементи (транзистори и операционни усилватели) се заменят с ръчно-управлявани елементи и човекът започва да изпълнява мислено техните функции. Чрез тази емпатия, той се отъждествява с тях и може да „почувства” действието на схемите. Например, в схемата на инвертиращия суматор на напрежение, операционният усилвател се заменя с ръчно управляван източник на напрежение, нулев индикатор и човек-изпълнител (фиг. 3.80).

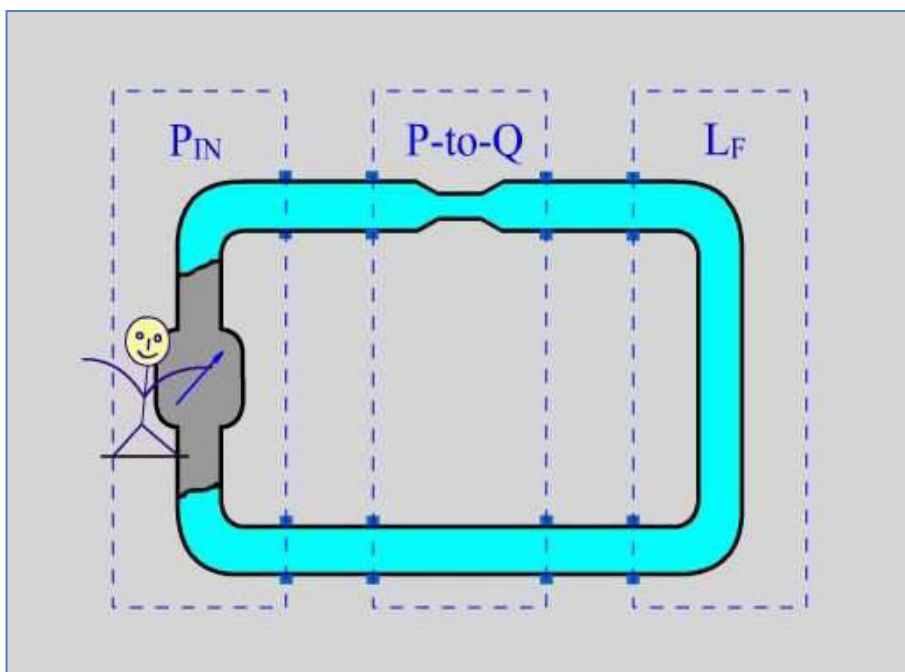


Фиг. 3.80. „Операционен усилвател”, направен от ръчно управляван източник на напрежение, нулев индикатор и човек-изпълнител.

3.3.3. ИЗПОЛЗВАНЕ НА АНАЛОГИИ ЗА ОПЕРИРАНЕ С ЕЛЕКТРОННИТЕ СХЕМИ

Още от момента на раждането си човек започва да натрупва опит за видимите явления на обкръжаващия ни свят (механични, хидравлични, биологични, социални и др.). Но светът, в който живеем, е така интересно устроен, че в много случаи явления с различна природа се подчиняват на едни и същи закони, т.е. те са аналогични. Това позволява да се пренесат естествено придобитите от живота знания върху невидимите, абстрактни електрически явления и така да се направят познати, елементарни и достъпни за хората. Това можем да се илюстрира с популярната схема на един *резистивен суматор* на напрежения, който най-често се използва в ролята на *изваждащо и сравняващо устройство*.

ФЛУИДНИ АНАЛОГИИ. Една от най-първичните представи на човека за елементарната електрическа верига е флуидната аналогия - под действие на налягането P в един затворен тръбопровод се движи флуиден ток с дебит I като среща по пътя си съпротивление R (фиг. 3.81). Източникът на напрежение в тази аналогия е представен чрез компресор, който поддържа постоянно налягане (точно като тези, които захранват пневматичните инструменти).

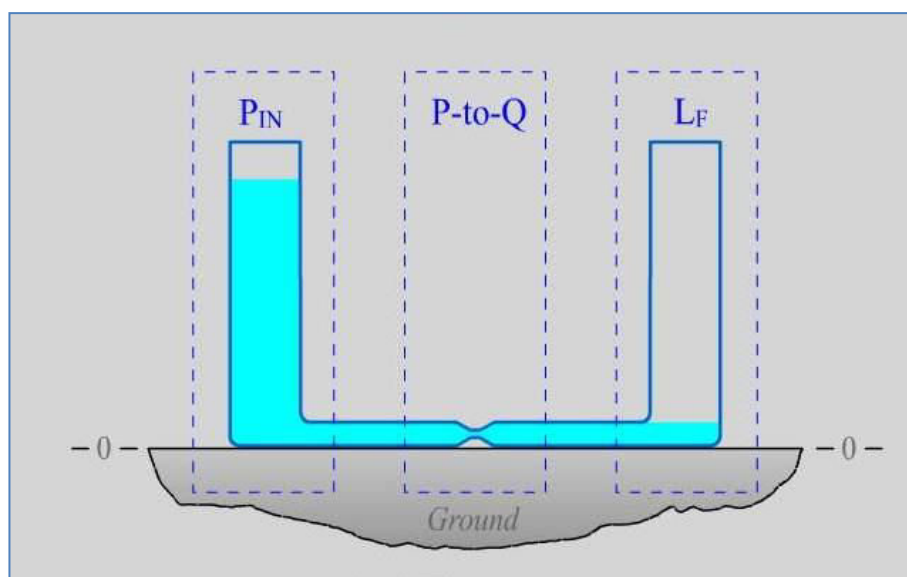


Фиг. 3.81. Флуидна аналогия на елементарната електрическа верига.

За да се илюстрира действието на един пасивен резистивен суматор от паралелен вид, се включват два източника на налягане (фиг. 2.16). Техните въздействия се сумират в общата точка и така налягането върху товара представлява сума на входните налягания. Ако това е аналогия на едно резистивно изваждащо (сравняващо) устройство, положителния входен източник на напрежение V_1 може да се представи като компресор, който нагнетява въздух и покачва налягането в общата точка. Отрицателния входен източник V_2 пък се представя като компресор, който изсмуква въздуха и създава вакуум в точката. Образно казано, двата компресора се “борят” помежду си и ако наляганията им се отнасят както принадлежащите им въздушни съпротивления ($P_2/P_1=R_2/R_1$) налягането в общата точка е равно на нула. Този феномен може да се нарече образно *флуидна виртуална маса*.

ХИДРАВЛИЧЕСКИ АНАЛОГИИ. Освен като компресор, който поддържа постоянно налягане, един източник на напрежение може да се представи и като цилиндричен съд с постоянно ниво на водния стълб (фиг. 3.82).

В аналогията на едно изваждащо устройство, положителният входен източник на напрежение V_1 ще представлява съд, поставен на земната повърхност (нулевото ниво), а отрицателният източник V_2 - съд, спуснат под земната повърхност. Хидравличното налягане в общата точка отново ще бъде равно на нула - това пък може да се нарече *хидравлична виртуална маса*.



Фиг. 3.82. Хидравлична аналогия (скачени съдове) на елементарната електрическа верига.

МЕХАНИЧЕСКИ АНАЛОГИИ. Една от най-популярните механически аналогии е лостът на Архимед, който в този пример се управлява едновременно от двете страни. Когато е изпълнено равенството $h_2/h_1 = l_2/l_1$, в общата точка се получава *виртуална механическа маса*. Ако стилизираме тази аналогия, ще достигнем до по-абстрактната гометрическа аналогия *потенциална диаграма*.

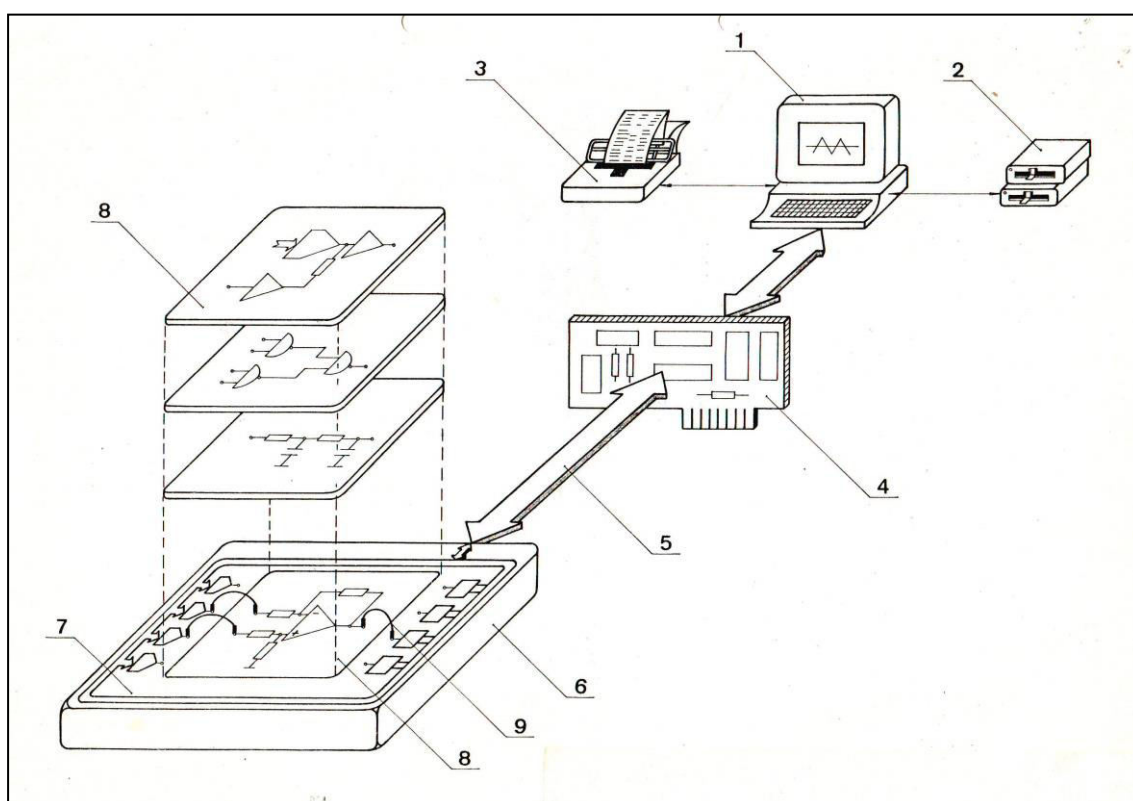
Не по-малко знаменита е и тегловната аналогия - механическа везна, с помощта на която се сравняват две тегла. Показалецът на везната сочи *виртуална механическа маса*, когато е изпълнено равенството $P_2/P_1 = l_1/l_2$.

3.4. РАЗРАБОТВАНЕ НА НАБОР ОТ ТЕХНИЧЕСКИ СРЕДСТВА ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА ЕВРИСТИЧНИЯ ПОДХОД В СХЕМОТЕХНИКАТА

3.4.1. МОДУЛНА МИКРОКОМПЮТЪРНА СИСТЕМА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА УЧЕБНИ ЛАБОРАТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ МИКРОЛАБ

3.4.1.1. Апаратно осигуряване.

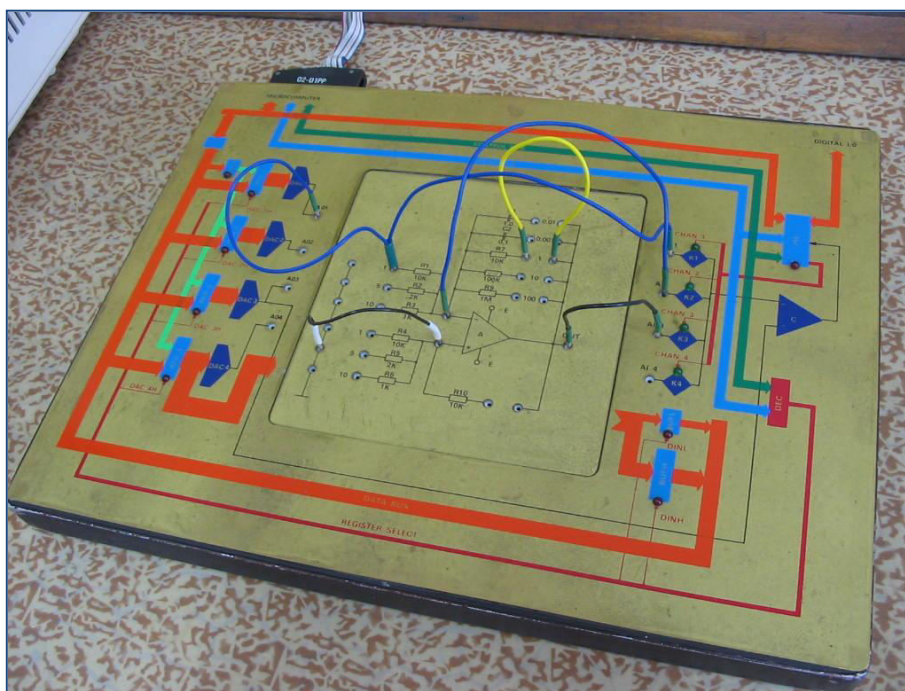
Системата е разработена за целите на учебните лабораторни експерименти през 1987 г. и е непрекъснато усъвършенствана и разширявана през следващите години [3]. Идеята (да се използва персонален компютър с богати текстови и графични възможности вместо специализирана микропроцесорна система) и изпълнението ѝ се оказват гъвкави и удачни за целите на учебния процес. С нея са се обучавали няколко хиляди студенти, като тя се използва и до днес. Състои се (фиг. 3.83) от персонален компютър 1, контролер 4 и лабораторен макет (стенд) 6 с постоянна периферна (измервателна) част 7, в центъра на която се монтира изследваната схема върху сменяем модул 8. Връзката между тях се осъществява външно чрез гъвкави свързващи проводничета 9 и вътрешно чрез лентов кабел.



Фиг. 3.83. Компонентите на система МИКРОЛАБ (компютър, контролер и лабораторен макет със сменяеми модули) и начина на свързването им.

Система МИКРОЛАБ е създадена с идеята на едно дидактическо (учебно-техническо), а не просто измервателно средство. С тази цел, конструктивното изпълнение на макета (фиг. 3.84) е специално пригодно за целите на учебната дейност, като разкрива максимално

вътрешното ѝ устройство. Макетът е плосък, с голяма лицева плоча, върху която е нанесена многоцветна блокова схема на системата. Долната плоча на макета е отстранена още при първите занятия със студентите, за да се виждат и пипат свободно елементите върху платката. Тяхното разположение съответства на схемата върху лицевата плоча, така че във всеки един момент може да се види съответствието между реалните елементи и символичните им означения.



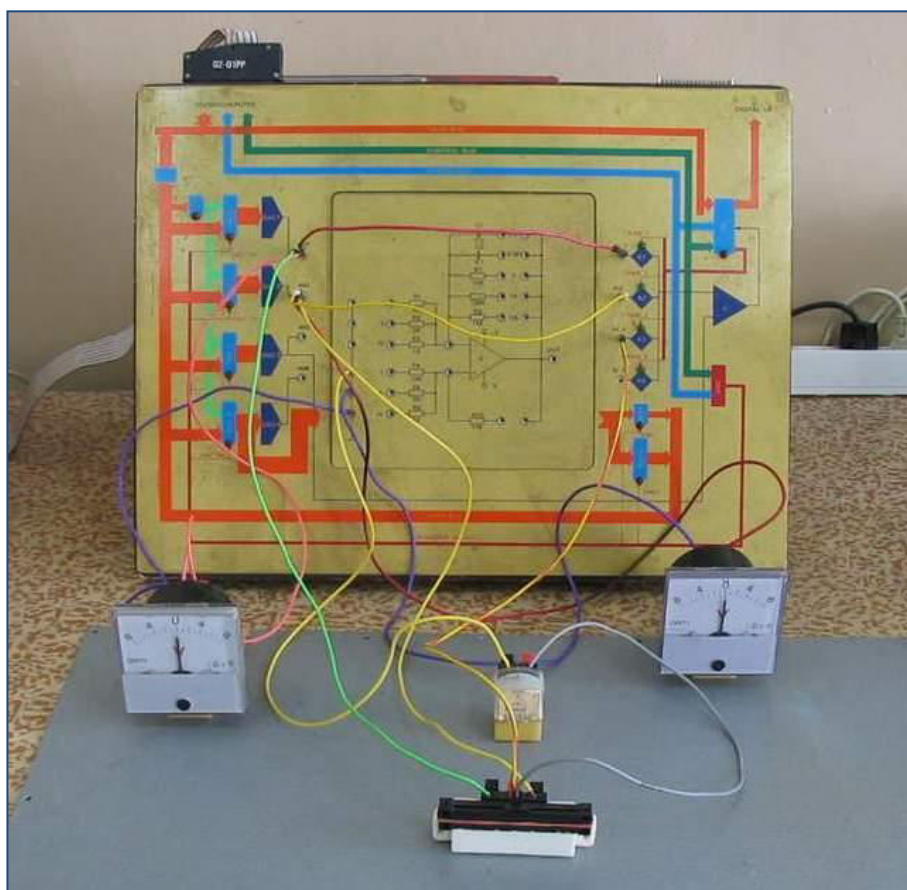
Фиг. 3.84. Лабораторният макет на система МИКРОЛАБ е максимално пригоден за целите на учебния процес: плоска конструкция с голяма площ и многоцветна лицева плоча с нанесена блокова схема на системата.

От схемата върху лицевата плоча се вижда, че това е една типична микрокомпютърна система с богата периферия и поради това макетът може да се използва и по дисциплината *Микропроцесорна и микрокомпютърна техника*. Виждат се общите елементи: магистрали (данни, адреси и управление), буфери, регистри, адресен дешифратор, периферен интерфейсен адаптор, аналогов мултиплексор, компаратор. Сигналите CS (избор на чипа) са визуализирани със светодиоди така, че във всеки един момент студентът вижда кое устройство е избрано от микропроцесора.

Макетът се състои от три части, разположени последователно отляво надясно, по посока на движение на сигналите, както следва: изходна част, изследван обект, входна част.

Изходната част се състои от четири цифрово-аналогови преобразувателя (DAC1÷DAC4), които са 12-разредни и генерират двуполярни изходни напрежения в диапазона $\pm 10V$. Те се подават към входовете на изследвания обект с помощта на съединителните кабелчета. Освен това има и 8-разреден изходен канал (порт) за извеждане на цифрови сигнали към обекта.

Обектът е специфичен за провеждания лабораторен експеримент (показаният на фиг. 3.84 многофункционален сменяем модул е предназначен за изследване на базови схеми с операционни усилватели). Разработени са също модули за изследване на аналогово-цифрови и цифрово-аналогови преобразуватели, цифрови и импулсни схеми, универсален модул с наборно поле за свързване на схеми без запояване. Освен чисто електрически, разработени са и електромеханически модули за управление на стъпков и постоянен ток двигател, както и програмно осигуряване за провеждане на разнообразни експерименти с тях. Изследваните обекти могат да бъдат не само монтирани върху сменяемия модул, но и разположени външно (фиг. 3.85), което дава неограничени възможности за провеждане на разнообразни лабораторни експерименти.



Фиг. 3.85. Опитна постановка за „изобретяване” на резистивни преобразуватели (отговаря на фиг. 3.74). Елементите на схемата (потенциометър и измервателни уреди) са разположени извън макета. Потенциометърът може да се разглобява, което позволява студентът да има достъп до резистивния му слой.

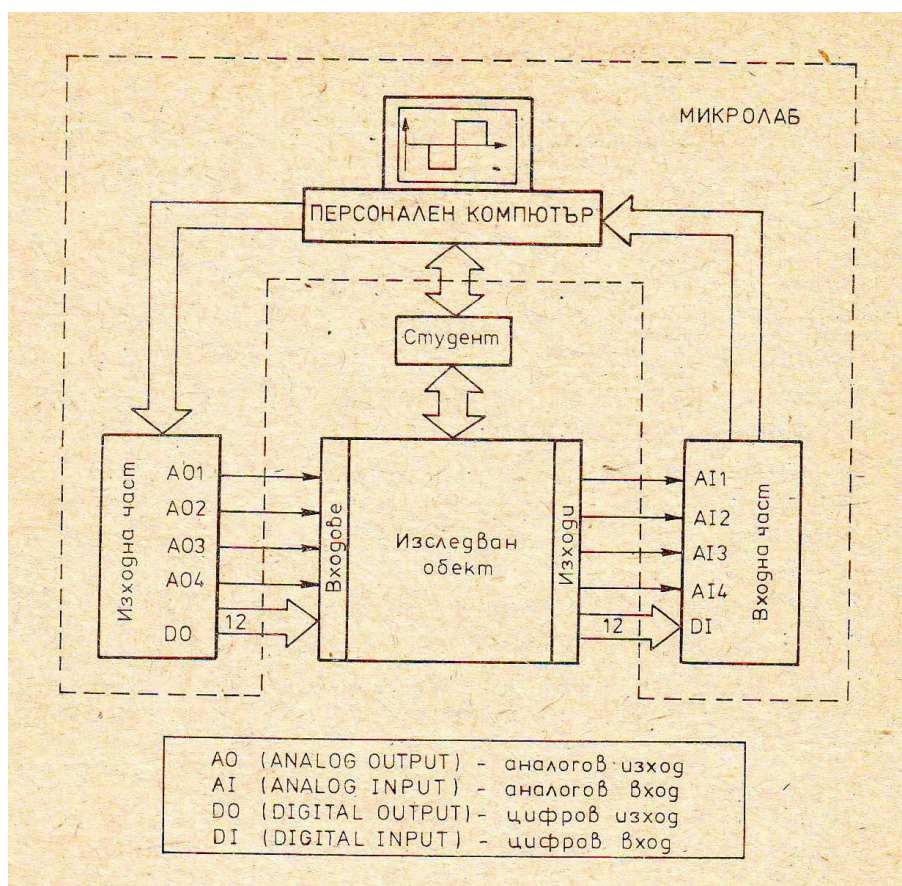
Входната част се състои от 4-входов аналогов мултиплексор и цифрово-аналогов преобразувател (ADC), който е 12-разреден и възприема двуполарни входни напрежения в диапазона $\pm 10V$. Те се вземат от изходите и вътрешни контролни точки на изследвания обект с

помощта на съединителните кабелчета. Има и 8-разреден входен канал (порт) за въвеждане на цифрови сигнали от обекта. Блоквата схема на система МИКРОЛАБ е показана на фиг 3.86.

3.4.1.2. Програмно осигуряване.

Под управлението на различни програми, системата може да се превъплъщава в различни роли. Така например, стандартната програма МИКРОЛАБСКОП я превръща в 4-канален осцилоскоп и характериограф, с помощта на който може да се снимат в графичен вид различни характеристики на обекта. На екрана на монитора се изобразяват следните елементи (фиг. 3.87):

- графики на входните сигнали (предавателни или временни характеристики) до 4 бр.
- полета за цифрово отчитане на моментни стойности – 4 бр.
- маркер за отчитане на моментни стойности
- курсор за работа в текстов редактор



Фиг. 3.86. Блокова схема на система МИКРОЛАБ.

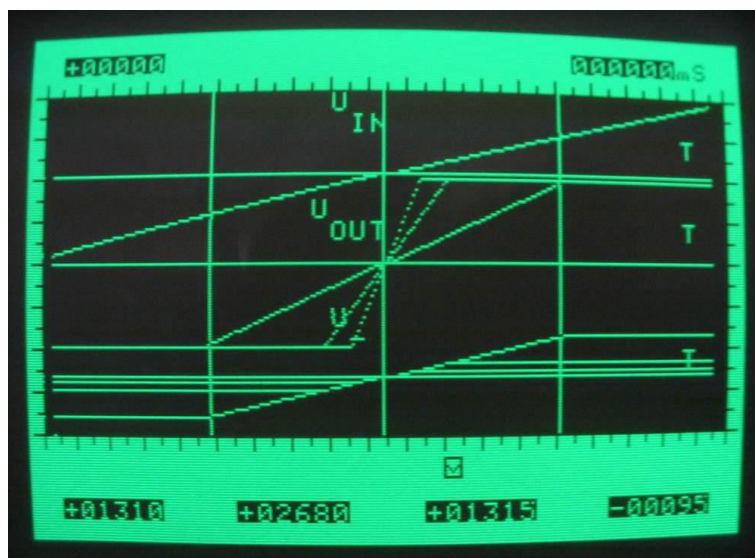
Командите се подават директно от клавиатурата в следните режими на работа:

- снемане на предавателни и временни характеристики
- графична обработка на изображенията (преместване и мащабиране)
- отчитане на моментни стойности чрез маркер

- задаване на постоянни стойности на изходните напрежения
- текстов режим

Снемането на семейство от предавателни характеристики се осъществява по изключително прост начин като те се наслагват в графичната страница. Така може да се снемат и насложат неограничен брой характеристики при различни стойности на параметъра.

Програмата МИКРОЛАБСКОП е написана на асемблер и затова е бърза и оптимална. При проектирането на системата е отчетено, че това не е просто техническо измервателно средство, а е предназначено да обучава хора. Затова във функциите на програмното осигуряване са залегнали основните принципи на дидактиката (за нагледност и др.). Така например, снемането и изчертаването на предавателни и временни характеристики става едновременно, в *режим на реално време*: последователно се обхождат четирите аналогови входа, получените стойности се запомнят в поредните четири едноименни клетки на съответните четири масива и след това се изчертават четирите точки върху екрана. По този начин графиките се изчертават последователно, точка по точка, върху екрана и студентите могат да наблюдават развитието на процеса във времето. Като се променя честотата на дискретизация, може да се променя и скоростта на процесите, които се развиват на екрана (фиг. 3.87). Така тя може да се забави неограничено, да се направи съизмерима със скоростта на човешката мисъл и да работи дори в постъпков режим.



Фиг. 3.87. Резултати върху екрана на монитора, получени от изследването на неинвертиращ усилвател под управление на програмата МИКРОЛАБСКОП: входно напрежение V_{IN} , изходно напрежение V_{OUT} , напрежение на инвертирания вход V на операционния усилвател.

За целите на учебния процес, програмното осигуряване на система МИКРОЛАБ е допълнено с възможности за съхраняване и отпечатване на данните върху принтер.

По-сложни лабораторни експерименти могат да се провеждат под управлението на програми, написани на МИКРОЛАБ БЕЙСИК (фиг. 3.88). Това е разширение към интерпретатора на персоналния компютър, което извиква драйверни програми, написани на асемблер (например, типични входно-изходни команди са „IN” и „OUT”). С помощта на това разширение, през 90-те години са написани множество програми за провеждане на интересни автоматизирани лабораторни експерименти (например, „живи” аналогии, „живи” потенциални диаграми, волт-амперни характеристики и др.) Тогава възникна и идеята на „живите променливи”, които са свързани с определени портове на системата и непрекъснато се обновяват.

Благодарение на удачната си конструкция и дружелюбното програмно осигуряване, система МИКРОЛАБ става популярна през 80-те години. Представена е на международни изложения в Прага и Ленинград през 1988 г. и е усвоена за производство от Учебния завод на института.

Фиг. 3.88. Фрагмент от програма, написана на МИКРОЛАБ БЕЙСИК.

```

530 DI = IMAX / (Y0 - Y1)
540 REM ДЕКОРАТИВНА РЕШЕТКА
550 HPLOT X0,Y1 TO X0,Y0 TO X1,Y
    O TO X1,Y1 TO X0,Y1
560 REM РАЗГРАФЯВАНЕ
570 Y = Y0: GOSUB 870
580 X = X0: GOSUB 940
590 Y = Y1: GOSUB 870
600 X = X1: GOSUB 940
610 HOME
620 REM СЧЕТА НА ХАРАКТЕРИСТИКАТА
630 FOR Y = 0 TO Y0 - Y1
640 REM ИЗВЕЖДА ТОК IF
650 I = Y * DI
660 & "OUT"1, FN IOUT(I)
670 REM ИЗМЕРВА НАПРЕЖЕНИЕТО UF
680 & "IN"1,Z: IF Z < 2047 THEN
    Z = 2047
690 U = FN RO( FN UIN(Z))
700 REM ОТПЕЧАТВА UF, IF
710 VTAB 21: HTAB 1: PRINT "IF [
    MA] = "; INT (I);" "
720 VTAB 21: HTAB 25: PRINT "UF
    [MV] = ";U;" "
730 REM ИЗЧЕРТАВА ТОЧКА
740 X = FN F(Z)
750 IF X > X1 - X0 THEN X = X1 -
    X0
760 HPLOT X0 + X,Y0 - Y
770 NEXT Y
780 REM ПРЕКЪСВА ТОКА ЗА ДА НЕ
790 REM ЗАГРЯВАТ ЕЛЕМЕНТИТЕ
800 & "OUT"1, FN IOUT(0)
810 VTAB 23: PRINT " ИЗТРИВАНЕ-[
    ESC]      НАСЛАГВАНЕ-[RETURN]"

820 REM ЧАКА КОМАНДА
830 GET A$
840 IF A$ = CHR$ (13) GOTO 610
850 IF A$ = CHR$ (27) GOTO 420
860 VTAB 23: PRINT "": GOTO 830
870 REM РАЗГРАФЯВАНЕ ПО X
880 FOR I = X0 TO X1 + 1 STEP 5 *
    SX
890 HPLOT I,Y - 2 TO I,Y + 2
900 FOR J = X0 TO X1 STEP SX
910 HPLOT J,Y - 1 TO J,Y + 1
920 NEXT J: NEXT I
930 RETURN
940 REM РАЗГРАФЯВАНЕ ПО Y
950 FOR I = Y0 TO Y1 - 1 STEP -
    5 * SY
960 HPLOT X - 2,I TO X + 2,I
970 FOR J = Y0 TO Y1 STEP - SY
980 HPLOT X - 1,J TO X + 1,J
990 NEXT J: NEXT I
1000 RETURN

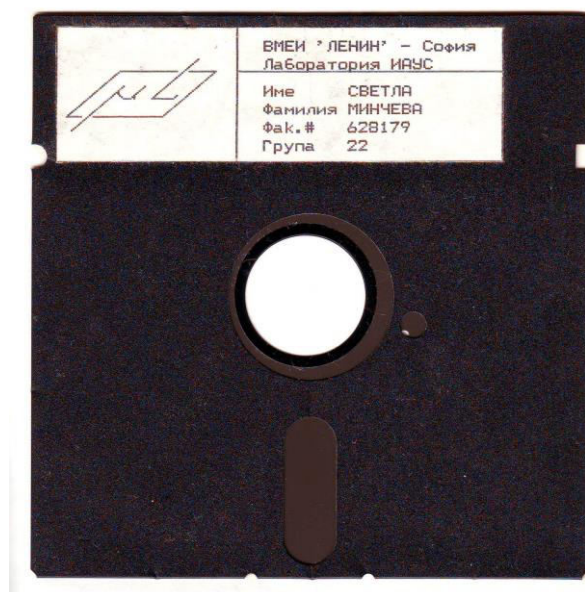
```

3.4.1.3. Образователна технология МИКРОЛАБ.

Върху основата на това техническо средство през 80-те години беше разработен комплекс от организационни, методически и дидактически средства, наречен *образователна технология МИКРОЛАБ* [3]. Той бе експериментиран през 1987 г. с 11 групи от общо 270 студента по дисциплината "Изчислителни аналогови устройства и системи" (ИАУС) по следния начин.

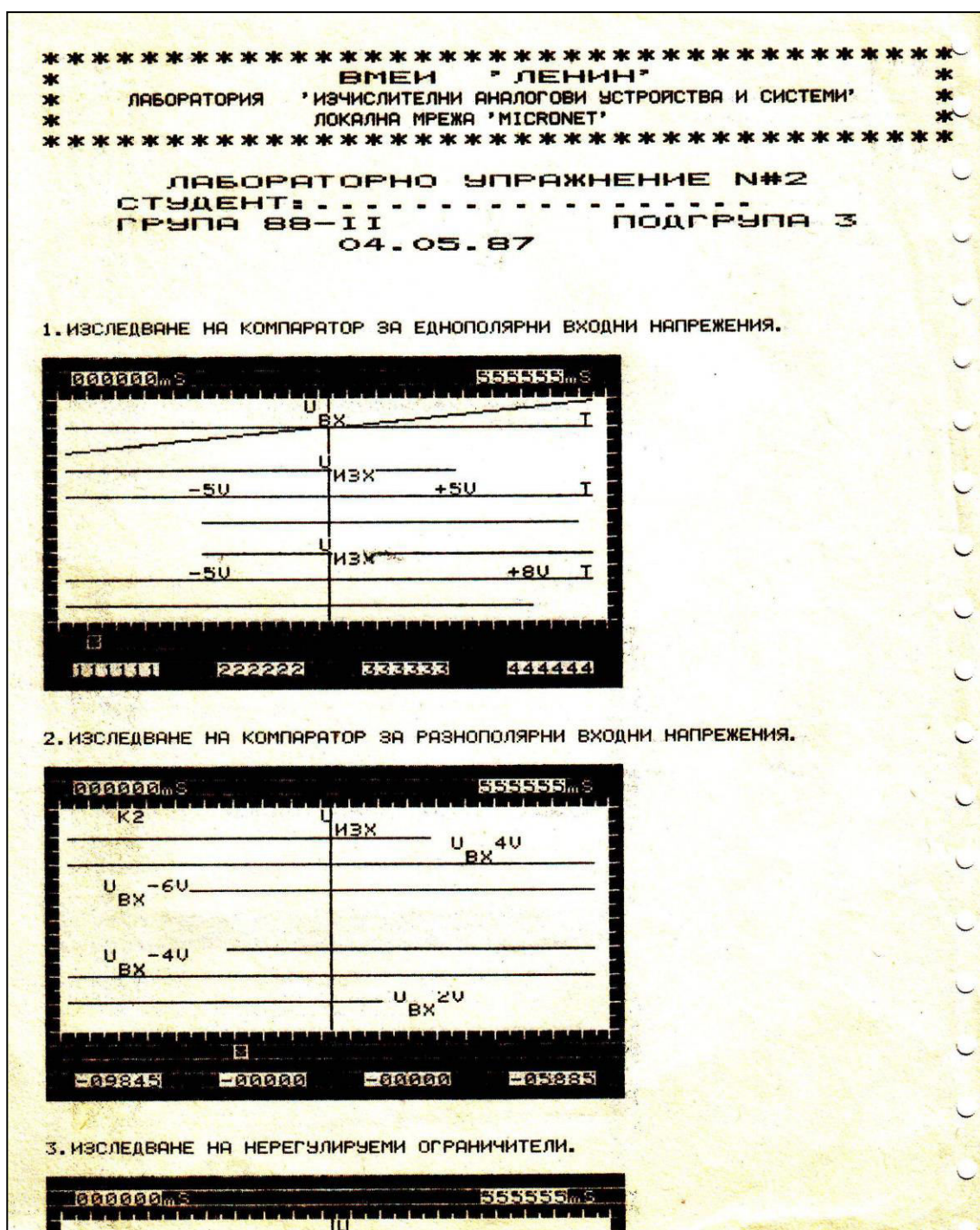
Лабораторията по ИАУС беше оборудвана с три работни места МИКРОЛАБ и едно четвърто „офисно” място с принтер. Те бяха свързани с локална мрежа МИКРОНЕТ, която позволяваше студентите да отпечатват протоколите си върху общия мрежов принтер.

На всеки студент беше предоставена индивидуална дискета (фиг. 3.89), на която той записваше резултатите от лабораторните си експерименти по време на семестъра. Тези общо 270 дискети бяха първоначално форматирани, инициализирани и надписани с данните на студентите от членовете на проблемната група МИКРОЛАБ. Резултатите от лабораторните експерименти се разпечатваха от програмата под формата на протокол (фиг. 3.90), като данните на студента се извличаха от индивидуалната му дискета и се отпечатваха в заглавната част.



Фиг. 3.89. Индивидуална дискета на студентка от лабораторните упражнения по дисциплината ИАУС през 1987 г.

За да се осигури самостоятелна работа на студентите при ограничения брой работни места, беше изготвено индивидуално разписание (фиг. 3.91), в което всеки студент сам определяше желаното от него време за провеждане на лабораторното упражнение. Не се изискваше стриктно спазване на първоначалното разписание, единственото изискване беше в определените часове да има студенти на работните места. Индивидуално разписание се изготвяше за всеки цикъл (2 седмици) от лабораторните занятия. Така например, на фиг. 3.91 е показано „новогодишното” индивидуално разписание за 1987 год.



Фиг. 3.90. Индивидуален протокол от упражнението „Изследване на нелинейни устройства с операционни усилватели“, проведено на 4.05.1987 г. в лабораторията по ИАУС. Разпечатан е с помощта на програмното осигуряване на система МИКРОЛАБ като данните на студента са извлечени от индивидуалната му дискета и отпечатани в заглавната част.

(28-31).12.87г.

НА ЧАСОВЕТЕ ЗА ЛАБ. У-НИЯ

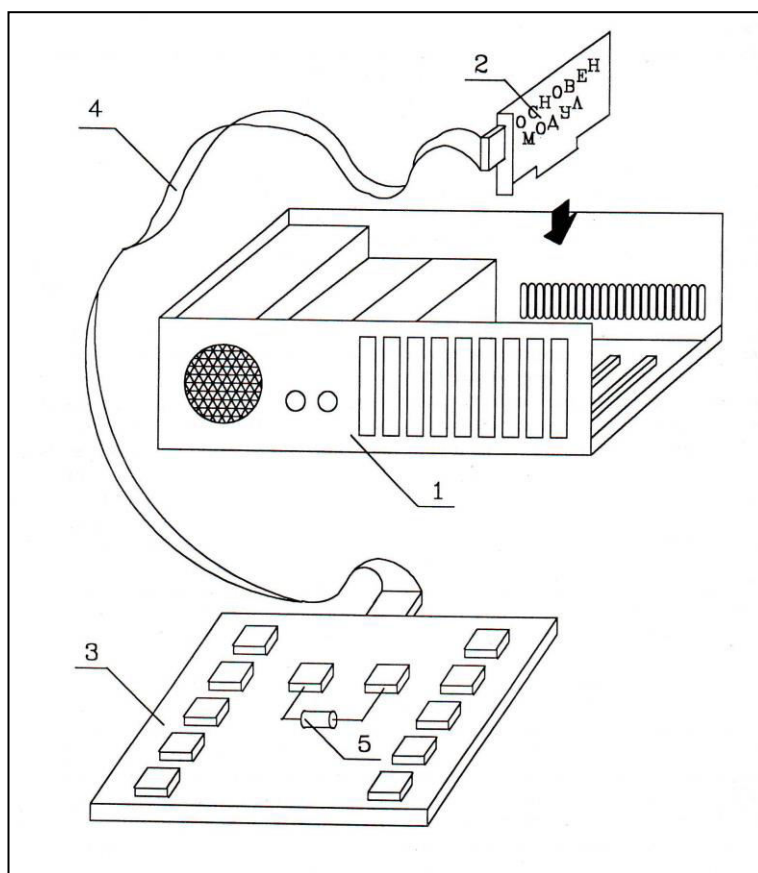
13,30	14,50	16,15	16,30	17,50	19,15
Колеги,					
В тези часове ви предоставяме лабораторията за практически занимания по: ■ курсовата работа; ■ учебно-изследователската работа и ■ самостоятелна работа. МИКРОЛАБ ще ви помага в осъществяването на лабораторните експерименти. Чрез нея вие можете: ■ да въведете вашата програма; ■ да я експериментирате като използвате готовата апаратна част на МИКРОЛАБ; ■ да запишете програмата и резултатите върху индивидуалната дискета и да ги отпечатате върху принтер.					
Д. Гоцева Ваня Тодорова		Е. Зидарова В. Генчева		Д. Димитрова М. Пигова	
				К. Банков Ю. Костов	
В. Тодорова Н. Коева		И. Стоева Н. Палешкова		А. Панайотов А. Магдади	
				Д. Иванов Д. Василев	
С. Чукуетке Р. Алексиева		В. Кирилова А. Кадийска		В. Велев М. Костов	
				Н. Митева Б. Тухлев	
Р. Жижанов К. Беневски		И. Аюад М. Дицов		С. Муса Айуб Имад Отман	
И. Доцев Т. Ламбев		П. Джогов С. Суртев		Раед Абед Джамил Хадад	
З. Цеков Л. Христов		А. Иванова Л. Йончева		З. Рауаш Д. Кадуми	
				М. Генова З. Янев	
				В. Христов В. Василев	
				Х. Хамден С. Манна	
***** * Ч Н Г * *****					
1-ви час 2-ри час 3-ти час 4-ти час					
13,30	14,45	15,00	16,15	16,30	17,45
18,00					
19,15					

Фиг. 3.91. Индивидуално разписание (показана е само дясната част на бланката) за провеждане на лабораторни упражнения по ИАУС в края на декември, 1987 г.

3.4.2. ВГРАДЕНА МИКРОКОМПЮТЪРНА СИСТЕМА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА УЧЕБНИ ЛАБОРАТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ ДИДАЛАБ

3.4.2.1. Апаратно осигуряване.

Система ДИДАЛАБ (ДИДАктически средства в учебната ЛАБоратория) представлява следващ етап в развитието на система МИКРОЛАБ, който е разработен през 90-те години [50]. Изпълнена е конструктивно като една платка (контролер), която се поставя в периферен съединител (ISA шина) на персоналния компютър (фиг. 3.92). На нея са разположени всички елементи от периферията: цифрово-аналоговите и аналогово-цифровите преобразуватели, аналоговият мултиплексор, схемата „следене-запомняне”, дешифраторът и др. С помощта на лентов кабел, контролерът се свързва с изследвания обект, който може да бъде оформен по различни начини. Тази конструкция има предимството, че е компактна, опростена и по-гъвкава. Блоковата схема на система МИКРОЛАБ е показана на фиг 3.93.



Фиг. 3.92. Компонентите на система ДИДАЛАБ (компютър, контролер, работен модул) и тяхната взаимна връзка.

КУРС "ЕЛЕКТРОНИКА ЗА ИЗОБРЕТАТЕЛИ"
ЧАСТ I: ЕЛЕКТРОТЕХНИКА
21.05.92

Занятие 8: СУМАТОР НА НАПРЕЖЕНИЯ
(или ВЪЛШЕБНАТА ЕЛЕКТРИЧЕСКА "ВЕЗНА")

1. "ИЗОБРЕТАВАНЕ" НА СХЕМАТА.

1.1. Защо не се разглежда такова устройство в учебниците по електротехника и електроника (или феномена на гората и дърветата)?

1.2. Две гледни точки за представяне на схемата.

1.3. Да започнем от гледната точка "делител на напрежение"!

■ Да се запознаем с изобретателския "принцип на изместването" или

■ Какво ще стане, ако "изместим земята" на обикновения делител на напрежение с един втори източник на напрежение?

2. ЕКСПЕРИМЕНТИ.

2.1. Изследване на "живата" потенциална диаграма в зависимост от входните напрежения U_{in1} , U_{in2} и положението на плъзгача K .

ЕКСПЕРИМЕНТ 1:

1. $U_{in1}=0$, $U_{in2}=0$ (изходно положение).
2. $U_{in1}=var$, $U_{in2}=0$ ("прав" делител).
3. $U_{in1}=0$, $U_{in2}=var$ ("обратен" делител).
4. $U_{in1}=var$, $U_{in2}=+const$ ("изместен" нагоре "прав" делител).
5. $U_{in1}=var$, $U_{in2}=-const$ ("изместен" надолу "прав" делител).

■ Удивително! Върху резистивния слой се появи точка с нулев потенциал (феноменът "виртуална земя").

■ Какви са условията за образуване на "виртуална земя"?

■ Механическа аналогия "ножица, обърната наляво".

6. $U_{in1}=+const$, $U_{in2}=var$ ("изместен нагоре "обратен" делител).
7. $U_{in1}=-const$, $U_{in2}=var$ ("изместен надолу "обратен" делител).

■ Отново феноменът на "виртуалната земя"!

■ Механическа аналогия "ножица, обърната надясно".

8. U_{in1} и U_{in2} се изменят разнопосочно (въртяща се "жива" потенциална диаграма).

■ Уникално! Виртуалната земя остава неподвижна (основно свойство на схемите с паралелна отрицателна обратна връзка).

9. U_{in1} и U_{in2} се изменят еднопосочно (сканираща "жива" потенциална диаграма).

■ Феноменално! Виртуалната земя се мести по резистивния слой (сканира го).

■ Механическа аналогия "гилотина".

■ Еврика! "Открихме" ефекта на "мауровите" ивици!

2.2. "Геометрично" извеждане на израза, даващ връзката между величините U_{in1} , U_{in2} , U_{out} и K .

2.3. Аналитично извеждане на израза.

3. СРАВНЯВАЩО УСТРОЙСТВО НА НАПРЕЖЕНИЯ.

3.1. Защо сравнението е "живено важна" операция?

3.2. Кога в електрониката се сравняват електрически величини?

3.3. Как се сравняват (електрически) величини?

3.4. Да превърнем един резистивен суматор в сравняващо устройство!

ЕКСПЕРИМЕНТ 2: "Жива" аналогия "механическа везна - резистивен компаратор".

3.5. Дискретен резистивен суматор (компаратор).

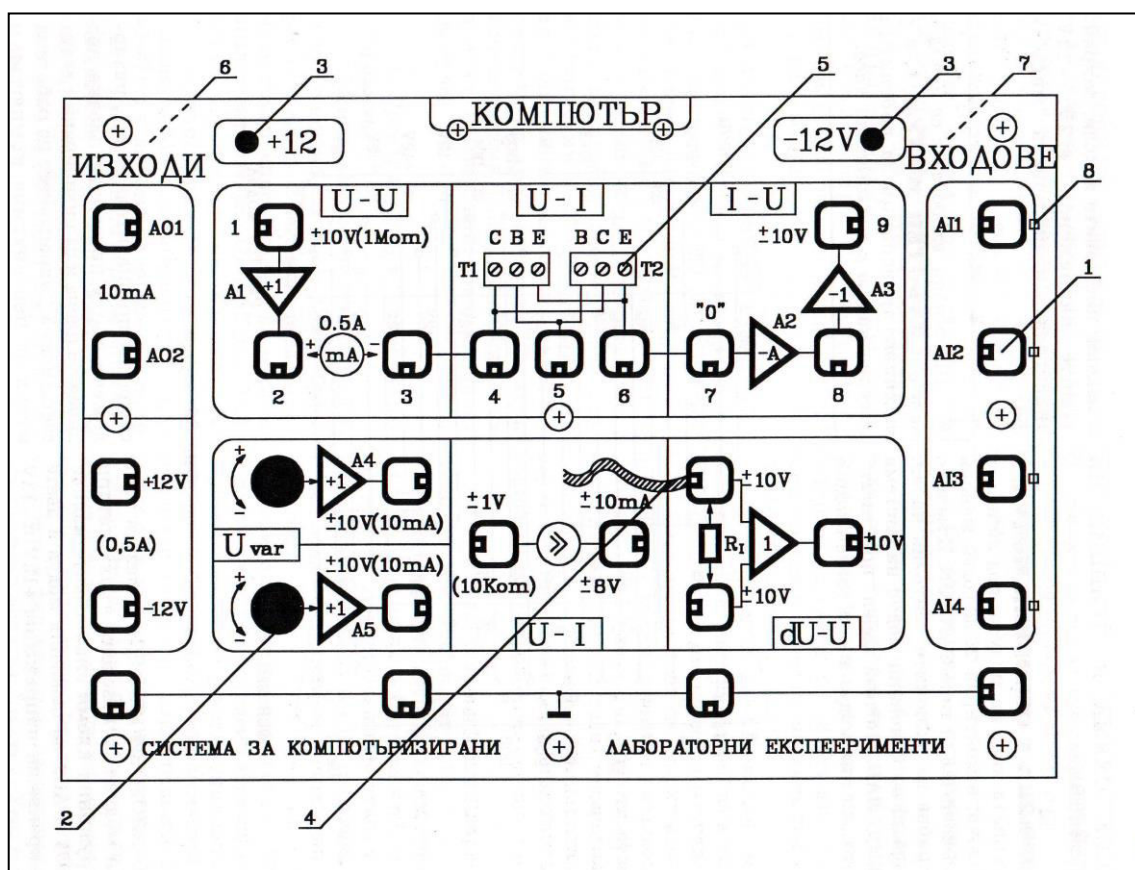
■ По какво си приличат и по какво се различават дискретният и аналоговият резистивни суматори (компаратори)?

Фиг. 3.94. Съдържание на едно от занятията от евристичния курс „Електроника за изобретатели“, проведено на 21.05.1992 г. в Техникума по съобщенията, София.

3.4.3. УНИВЕРСАЛЕН МОДУЛ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ И ЕЛЕМЕНТИ

Разработен е специално за изследване на двуполюсни, триполюсни и четириполюсни електронни елементи и устройства посредством генериране и възприемане на напрежения в обхвата $\pm 10\text{ V}$ и токове $\pm 500\text{ mA}$ [49]. Свързва се към система ДИДАЛАБ с помощта на лентов кабел, по който „пристигат” аналоговите входове и изходи. Свързването на изследваните елементи и схеми става лесно с помощта на пружинни клеми. Съдържанието на модула е изобразено на лицевата плоча (фиг. 3.95).

В лявата част на модула, върху четири пружинни клеми, са изведени аналоговите изходи AO1 и AO2 на системата и двете захранващи напрежения $+12\text{ V}$ и -12 V , които са индицирани със светодиодите 3. Симетрично, в дясната част на модула са изведени върху четири пружинни клеми 1 аналоговите входове AI1÷AI4 на системата. До всяка пружинна клема е монтиран миниатюрен светодиод 8, който светва, когато съответния канал е избран от микропроцесора.



Фиг. 3.95. Универсален модул за изследване на електронни елементи и схеми посредством компютризираната система ДИДАЛАБ.

В средната част на модула са разположени група от активни електронни преобразуватели: Преобразувател „напрежение-напрежение” (U-U). Представлява повторител на напрежение с мощно изходно стъпало (буферен усилвател), който увеличава товароспособността на

аналоговите изходи до 500 mA. В изходната верига на буферния усилвател A1 са предвидени клеми (2 и 3) за включване на милиамперметър mA. Отрицателната обратна връзка на усилвателя следи напрежението след милиамперметъра, като компенсира влиянието на вътрешното му съпротивление.

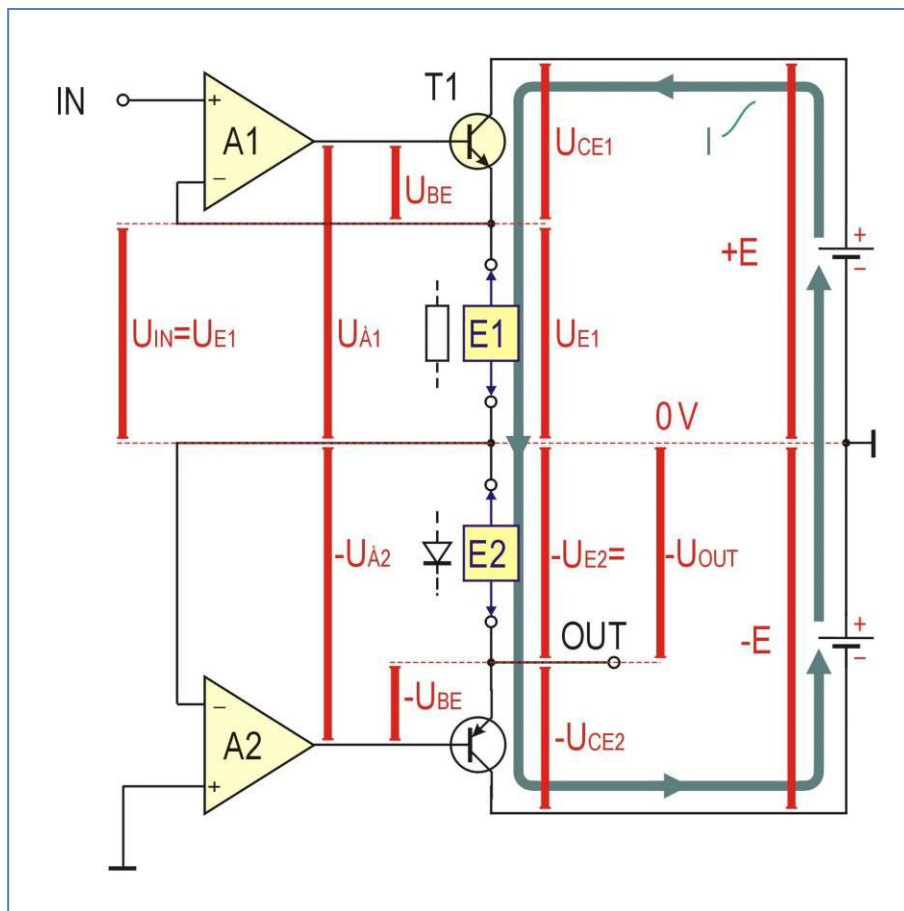
Преобразувател „напрежение-ток” (U-I). Когато изследваният елемент се включи в клеми 4 и 6, към него отляво се прилага напрежението от изхода на буферния усилвател A1. В резултат на това, през двуполусника протича ток със сила, определена от съпротивлението на изследвания двуполусник. Потенциалът от дясната страна на елемента (клема 6) се поддържа приблизително равен на нула от входа на следващата схема – преобразувателят „ток-напрежение” (той е виртуално „замасен” от инвертиращия вход на операционен усилвател – виж фиг. 3.15). Така напрежението върху двуполусника е винаги равно на входното напрежение и преобразувателят работи при почти идеални условия.

Преобразувател „ток-напрежение” с плаващ товар (I-U). Когато изследваният елемент се включи в клеми 7 и 8, през него ще протече токът на предишното стъпало. В резултат на това, върху двуполусника ще се появи напрежение с определена стойност, зависеща от съпротивлението на изследвания двуполусник. Операционният усилвател A2 изработва в изхода си (клема 8) напрежение със същата стойност, но с противоположна полярност. То унищожава (компенсира) напрежението върху двуполусника и поддържа потенциала на клема 7 приблизително равен на нула (феноменът *виртуална маса*, подробно разгледан в т. 3.1.1.1). Усилвателят A2 е с мощен двуполярен изход, който осигурява необходимия ток през двуполусника, когато той е нискоомен.

Всъщност преобразувателите „напрежение-ток” и „ток-напрежение”, взети заедно с принадлежащите им двуполусници E1 и E2, формират един вид *инвертиращ усилвател* – фиг. 3.96. „Вълшебното” свойство на тази система с паралелна отрицателна обратна връзка по напрежение е, че тя поддържа виртуален (фиктивен) нулев потенциал на клема 7, което осигурява идеални условия за работа на изследваните елементи.

Преобразувател „ток-напрежение” със замасен товар (I-U). Тази схема е една реализация на „идеалния” източник на ток на Хауленд (фиг. 3.38), който управлява „замасен” товар. Схемата е „идеална”, защото изходният ѝ ток зависи само от входното напрежение, но не и от напрежението върху товара.

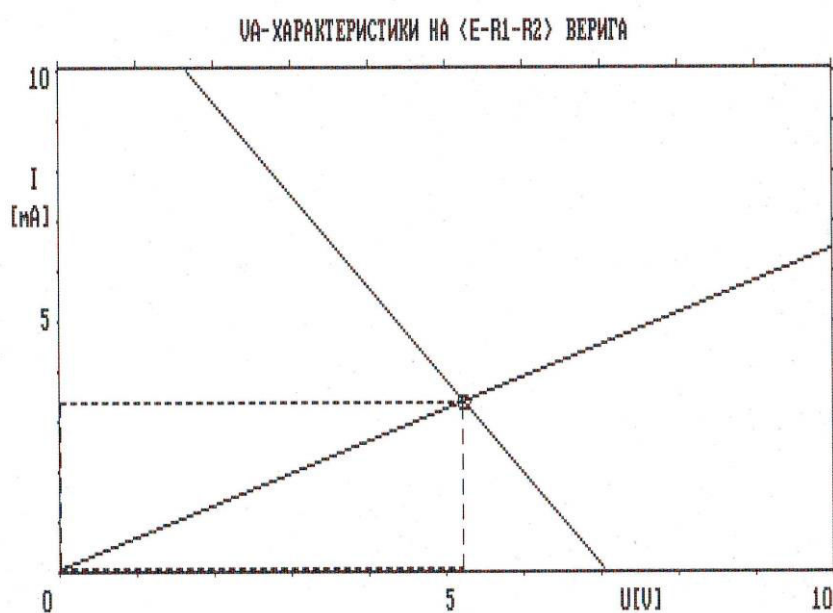
Преобразувател „диференциално-несиметрично”. Представлява диференциален усилвател, реализиран с операционен усилвател. Ако на входа му се включи нискоомен резистор R_I , може да се измерват големи токове в „незамасени” вериги. Измерваният ток протича през резистора като създава диференциален пад $U = I \cdot R_I$.



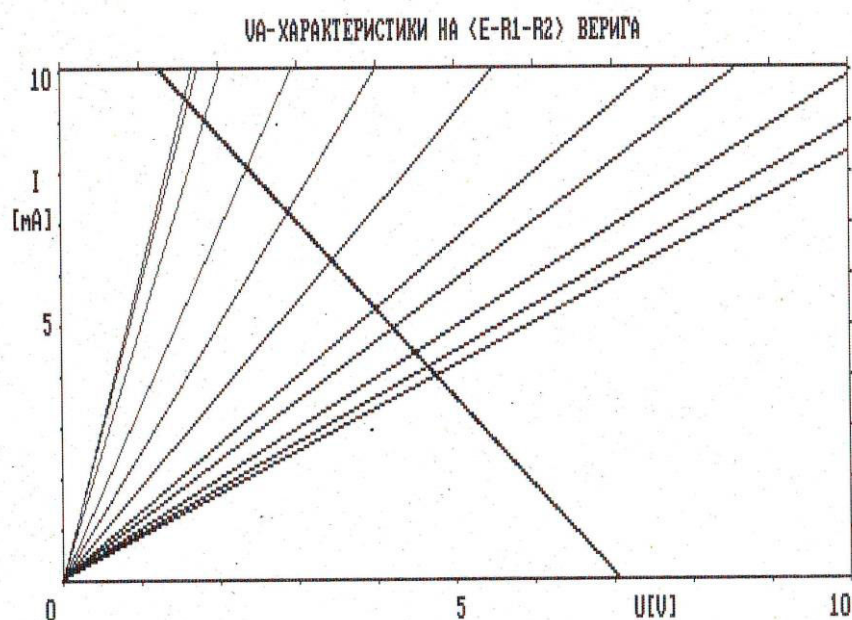
Фиг. 3.96. Опитната постановка, реализирана чрез универсалния модул за изследване на електронни елементи, всъщност представлява една разновидност на инвертиращ операционен усилвател.

С помощта на модула могат да се реализират интересни експерименти, илюстриращи действието на електронните схеми. Така например, на фиг. 3.97 е показана една „жива” графоаналитична интерпретация на изследването на резистивна верига (делител на напрежение) чрез насложени волт-амперни характеристики (виж т. 3.2.5). Вижда се работната точка (пресечната точка на двете волт-амперни характеристики) и правоъгълника на мощността, площта на който е пропорционална на разсейваната мощност върху резистора R1. Когато стойността на съпротивлението R1 се променя (фиг. 3.98), волт-амперната му характеристика се върти около началото на координатната система, а работната точка се плъзга по волт-амперната характеристика на другото съпротивление R2.

Експериментът е осъществен за първи път през 1992 г. в курса „Електроника за изобретатели”, провеждан от автора в Техникума по съобщенията, София.



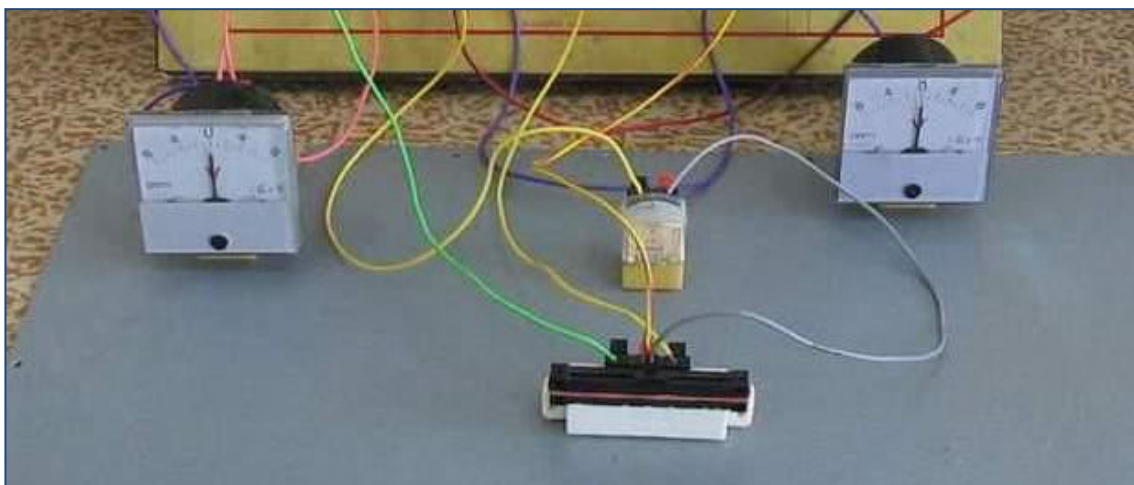
Фиг. 3.97. „Жива” графоаналитична интерпретация на резистивна верига: виждат се работната точка (пресечната точка на двете волт-амперни характеристики) и правоъгълника на мощността, площта на който е пропорционална на разсейваната мощност върху резистора R_1 .



Фиг. 3.98. Визуализиране на действието на горната схема при промяна на стойността на съпротивлението R_1 (волт-амперната му характеристика се върти около началото на координатната система, а работната точка се плъзга по волт-амперната характеристика на другото съпротивление).

3.4.4. КОМПЮТЪРИЗИРАНА ДИДАКТИЧЕСКА СРЕДА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА УЧЕБНИ ЛАБОРАТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

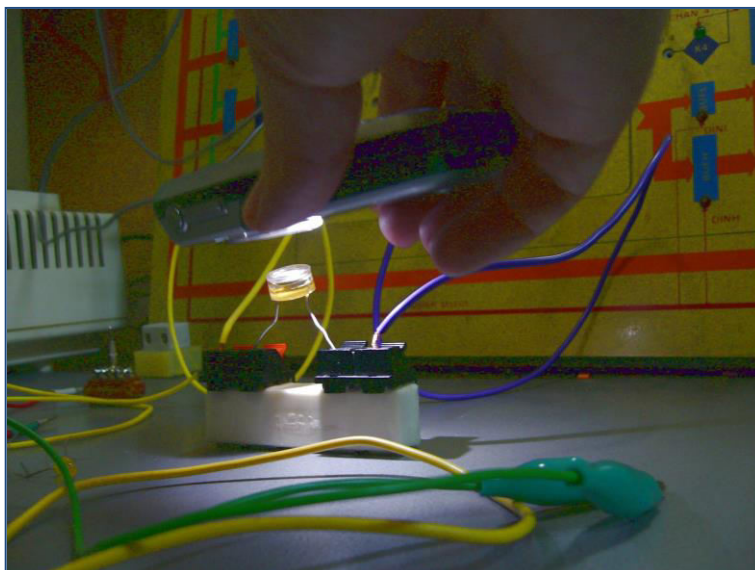
Разработена е с цел да се осигури максимална гъвкавост при осъществяване на учебните лабораторни експерименти. Съдържа набор от измервателни уреди (еднополярни и двуполярни волтметри и амперметри), различни изследвани обекти и помощни средства. Тези обекти се закрепват с помощта на магнити върху феромагнитна метална повърхност и се свързват чрез пружинни клеми и гъвкави съединителни проводници – фиг. 3.99 и 3.100. Това позволява да се правят разнообразни лабораторни експерименти без да е необходимо запояване на елементите върху платка.



Фиг. 3.99. Компоненти на дидактическата среда: различни измервателни уреди (двуполярни волтметри), изследван обект (потенциометър) с магнитно закрепване и гъвкави връзки с пружинни клеми. Вижда се и феромагнитната плоскост, върху която се „залепват“ компонентите.

Така върху основата на разработените технически средства може да се създаде богата компютъризирана дидактическа среда за провеждане на учебни лабораторни експерименти. Тя може да се представи символично като една многослойна структура (фиг. 3.101).

Ядрото, „зародишът“ на тази многослойна структура, е изследваният технически обект (схемата). В този естествен, „натурален“ вид, той до голяма степен е недостъпен за човешките сетива. Затова с помощта на първите, *технически слоеве*, се получава информация за изследвания обект в традиционен вид. Това може да бъде класическото едномерно представяне на данни от измервателните уреди в цифрова форма (технически слой 1), двумерно и тримерно представяне с помощта на осцилоскопи и компютри (технически слой 2) и др. По този начин, всеки следващ, по-външен технически слой, осигурява получаването на по-богата и преработена информация за обекта.



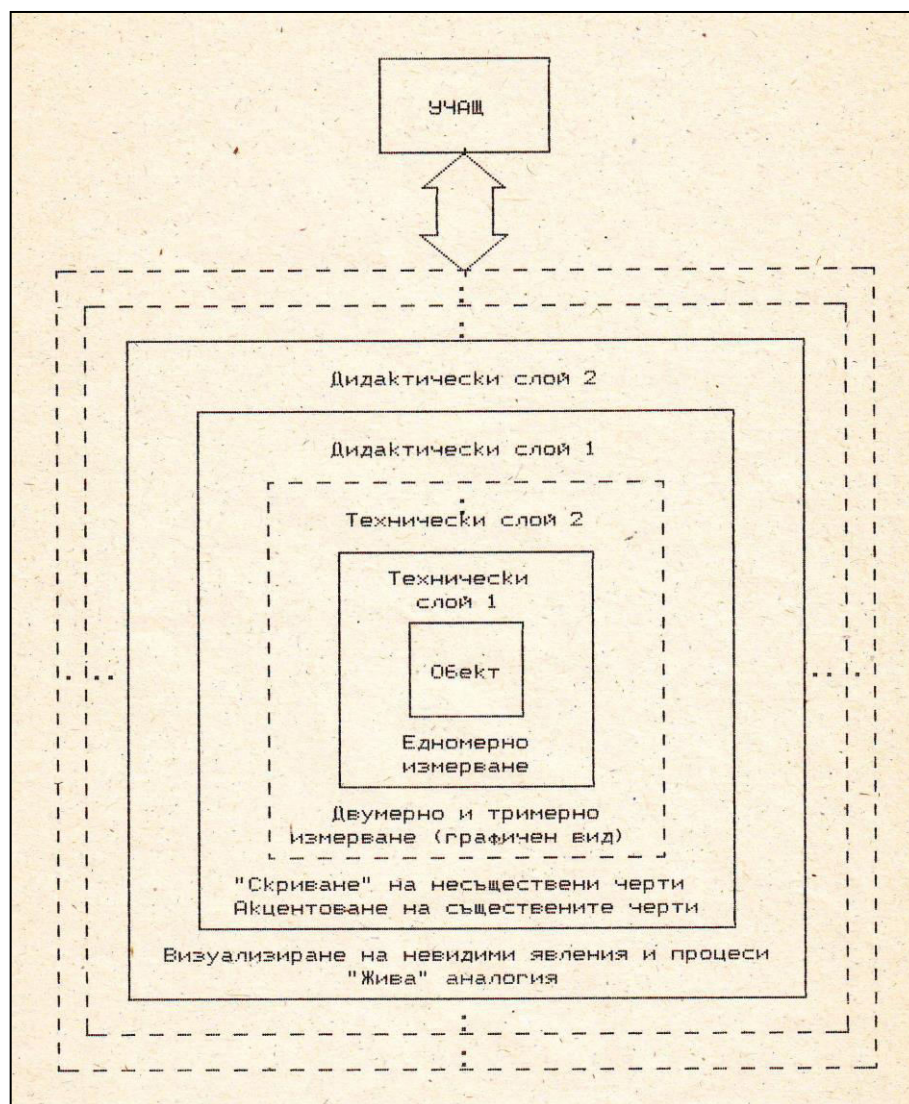
Фиг. 3.100. Фоторезистор, свързан в пружинните клеми на държач, „залепен” магнитно върху феромагнитната плоча. Студент използва мобилния си телефон, за да освети фоторезистора, а системата изобразява сигнала върху екрана на монитора.

За целите на обучението обаче възниква необходимост от допълнителни, *дидактически слоеве* на средата, с помощта на които реалният технически обект да се редуцира в учебен обект. Такива са например следните операции (дидактически слоеве):

1. Скриване на нежелани и акцентиране на желани черти на изследвания обект.

Реалните обекти представляват сложни устройства с множество спомагателни елементи, които нямат пряко отношение към същността на обекта (пример за това са захранващите вериги при електронните елементи, изводите на интегралните схеми и др.). В този случай е целесъобразно да се скрият изцяло или частично нежеланите елементи. Следователно, дидактически слой 1 играе ролята на един своеобразен филтър, който предпазва студента от смущаващото въздействие на несъществената за целите на обучението информация.

Реалните обекти са и многофункционални устройства, чиито изходни реакции зависят от много променливи величини, характеризиращи състоянието на обекта. Необходимо е да се изследва поотделно влиянието на всяка една от тези променливи върху състоянието на обекта като се потисне влиянието на останалите променливи (т.е., те да изпълняват ролята на параметри). От тази гледна точка, дидактически слой 1 е не само филтър, който потиска несъществените черти на изследвания обект, но и „усилвател” на съществените му чети. Той може да се пренастройва така, че отделните променливи на обекта да излизат последователно на преден план като в същото време останалите променливи са елиминирани (те са параметри). По този начин се правят отделни „сечения”, „разрези” на обекта от различни гледни точки, с което се разкрива многоаспектно вътрешното му устройство.



Фиг. 3.101. Достъпът на студента до изследвания обект може да се осъществи на различни нива, представени като обвивки (слоеве).

2. Коментиране на действието на изследвания обект.

Този дидактически слой разчленява изследваното явление на отделни елементарни операции, които се изпълняват в забавено темпо или дори в стъпков режим, и коментира изпълнението им (пример е програмата АНАЛОГОВО-ЦИФРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ). Образно казано, това е „говоряща“ дидактическа среда, която синхронно с действието на изследвания обект разказва на студента какви явления и процеси се развиват в него.

3. Консултиране на обучавания.

Следващият дидактически слой има още по-сложни, „сетивни“ функции. Той „наблюдава“ действията на обучавания студент, незабелязано за самия него, и ги коментира по подходящ начин (подсеща, напътства, оценява и т.н.).

4. Визуализиране на невидими величини, явления и процеси.

За целите на един научно-изследователски експеримент, получената с помощта на техническите слоеве информация за изследвания обект се представя традиционно в сух и аскетичен вид, като на измерваната величина (електрическа или неелектрическа) се съпоставя адекватно преместване (едномерно, двумерно или тримерно) на механичен елемент, светлинен лъч и др., или цифров код. Това се дължи на неизвестните свойства на изследвания технически обект и липсата на „интелигентност” в традиционната измервателна апаратура. Образно казано, измервателният уред „не знае” що за обект стои пред него и съответно по какъв начин да отразява получената от него информация (за това пък са „виновни” конструкторите, които не са знаели при конструирането му към какъв точно обект ще бъде включен уредът).

За целите на учебно-изследователския експеримент обаче ситуацията е коренно различна – има човек (преподавателят), който знае предварително каква информация и в какъв вид ще се получи от изследвания обект. При наличието на интелигентна компютъризирана среда, преподавателят може да я програмира предварително така, че тя да отразява по желанието от него начин състоянието на изследвания обект. Така, от сравнително оскъдни, експериментално получени данни за обекта, дидактическата среда ще визуализира състоянието и на други параметри, невидими за измервателната апаратура и обучавания студент.

Нещо повече, дидактическата среда би могла да визуализира и вътрешната структура на обекта и процесите, явленията, които се развиват в него, като резултат от действията на младия изследовател. Това може да се повтаря рекурсивно на нормално, макро- и микрониво, при което студентът се „потопя” все по-дълбоко в същността на изучаваната материя, като детайлизира знанията си за нея.

5. „Жива” аналогия.

Този най-външен дидактически слой синтезира адекватни на изследвания сложен обект аналогии (механически, хидравлически, електрически, биологически, социални и др.), които служат за опора при изучаването му. Като създават асоциации в съзнанието на студентите, „живите” аналогии развиват евристичното им мислене, позволяват им да вникнат дълбоко в същността на изследваните явления, като не само ги разберат, но и „почувстват”.

Този дидактически слой може да се състои от няколко рекурентно свързани подслоя, при което, след като бъде изучено действието на изследвания обект, той рекурентно заема мястото на „живата” аналогия (дидактически слой 5) и се използва за опора при онагледяването на следващ, по-сложен, но също аналогичен на него обект.

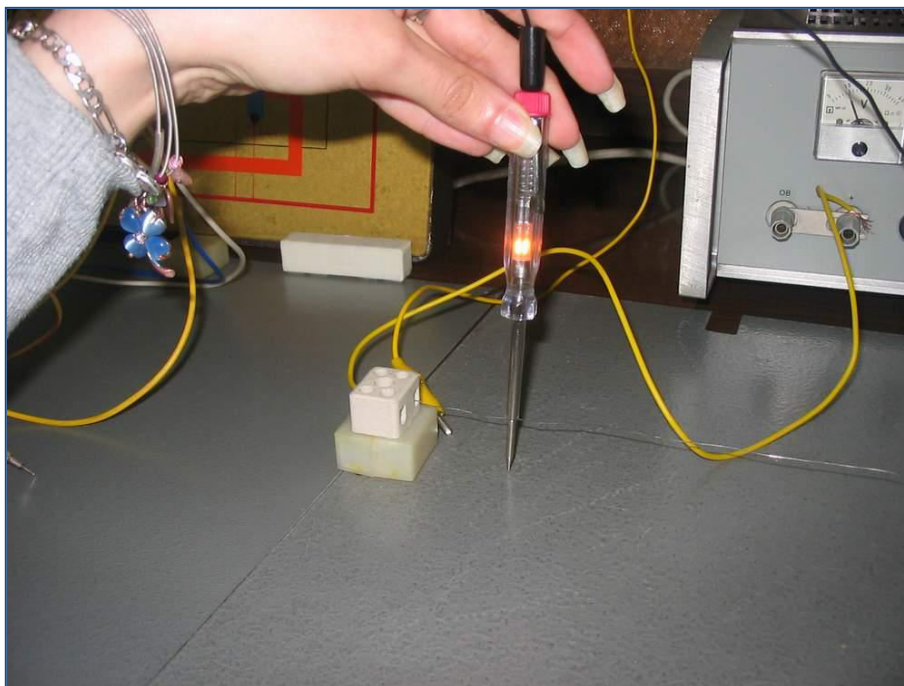
3.4.5. НЕТРАДИЦИОННИ УЧЕБНИ ЛАБОРАТОРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

За целите на евристичния подход са разработени нетрадиционни лабораторни експерименти, които развиват въображението и интуицията на студентите чрез изследването на нестандартни обекти.

3.4.5.1. Нестандартни резистивни елементи.

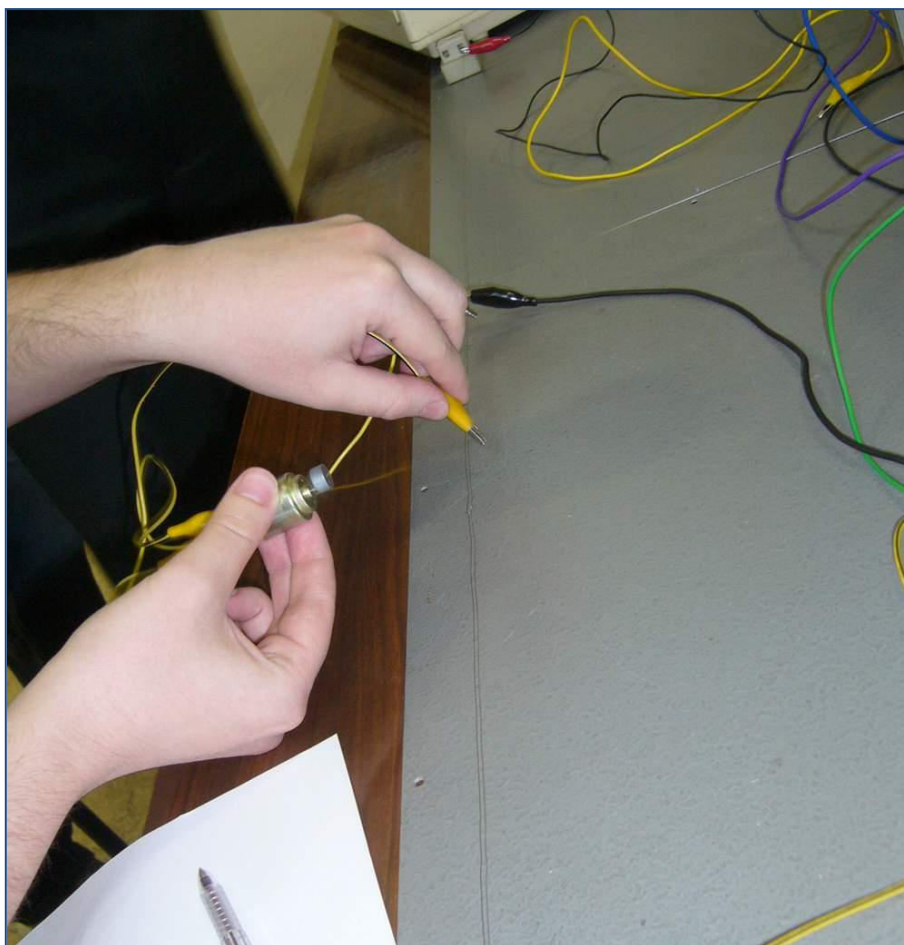
Класическите резистивни елементи (постоянни и променливи резистори), са затворени в подходящ корпус и поради това техният съпротивителен слой е недостъпен. Така те се разглеждат традиционно като елементи със съсредоточено съпротивление, без геометрични размери. За целите на евристичното представяне (например, за построяване на потенциални диаграми) често е необходимо съпротивителният слой да е достъпен, за да може студентите да го изследват („опипват“) така, както Ом го е правил в знаменития си експеримент, използвайки гол меден проводник. Поредица от такива експерименти е описана в страницата *Walking along the resistive film* от електронната книга *Circuit idea* на Wikibooks, създадена с участието на студентите от ФКСУ на ТУ София по дисциплината *Специализирана компютърна електроника* през 2008 г.

Едномерни (линейни) съпротивителни елементи. В началото на страницата са използвани голи съпротивителни проводници като резистивни елементи. Но те имат, макар и в по-малка степен, същия недостатък като медния проводник на Ом – съпротивлението им е сравнително ниско и токът е голям, което изисква мощен захранващ източник – фиг. 3.102 [61].



Фиг. 3.102. Изследване на разпределението на потенциалите по протежение на нискоомен съпротивителен проводник („реотан“), захранван от мощен източник.

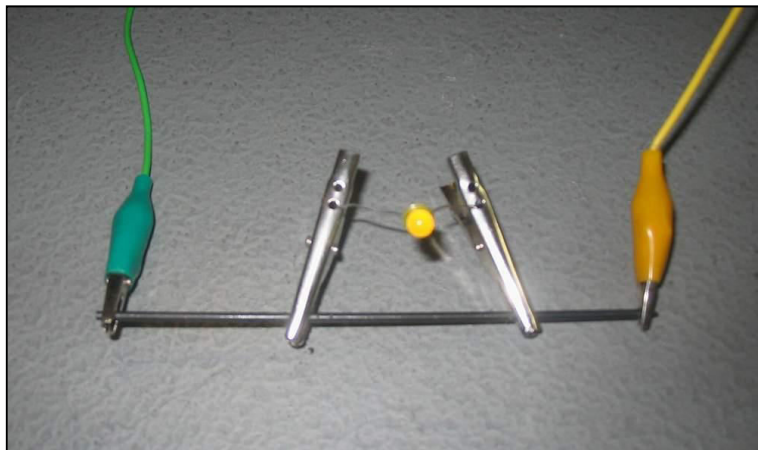
Предимството им обаче е, че могат да захранват нискоомни консуматори (пробната лампа на фиг. 3.102 и дори електродвигателчето на фиг. 3.103), включени паралелно към част от проводника.



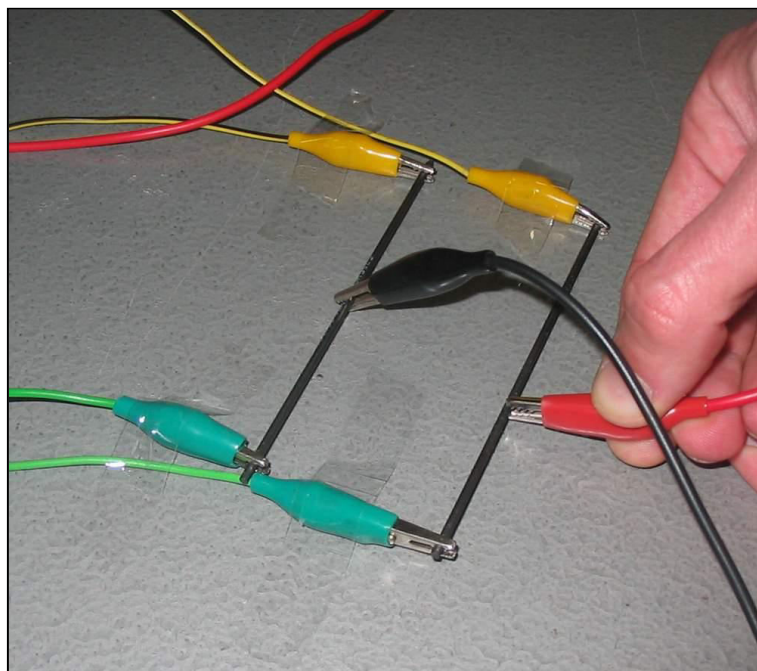
Фиг. 3.103. Предимството на нискоомния съпротивителен проводник е, че може да захранва нискоомни консуматори, дори и електродвигателче.

Друго предимство на тези „голи“ съпротивителни елементи е, че студентът добива визуална представа за стойността на съпротивлението от геометричните размери на елемента. Така например, като нетрадиционни съпротивителни елементи могат да се използват и различни видове графити. В илюстрация на това, на фиг. 3.104 е показан един своеобразен „графитен потенциометър“, който захранва светодиода. Много ясно се вижда, че падът на напрежение върху частта от графита, към която е включен светодиодът, представлява такава част от цялото приложено напрежение, каквато част от цялата дължина на графита представлява това парче (естествено, това важи, когато светодиодът все още не е отпушен и не шунтира тази част).

Тази идея е развита още повече на фиг. 3.105, където е свързан втори графитен потенциометър и е изграден „графитен мост“ на Уитстон.

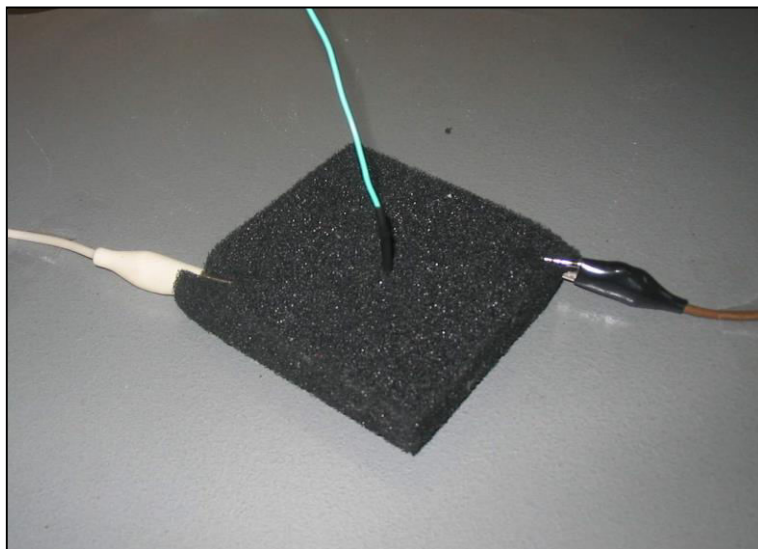


Фиг. 3.104. „Графитен потенциометър”, който захранва светодиод с напрежителния пад, отложен върху част от дължината му.



Фиг. 3.105. „Графитен мост” на Уитстон, реализиран с два „графитни потенциометъра”, дава добра визуална представа за мостовата идея.

Двумерни съпротивителни елементи. Други съвременни резистивни материали са например различните видове проводяща гума и порести материи („дунапен”). Те вече имат високо съпротивление и трябва да бъдат натоварвани с високоомни измервателни уреди и консуматори. С тях могат да бъдат направени дори двумерни съпротивителни елементи – фиг. 3.106, с които да се направят изключително интересни експерименти, подобно на електролитните вани, използвани в електротехниката.



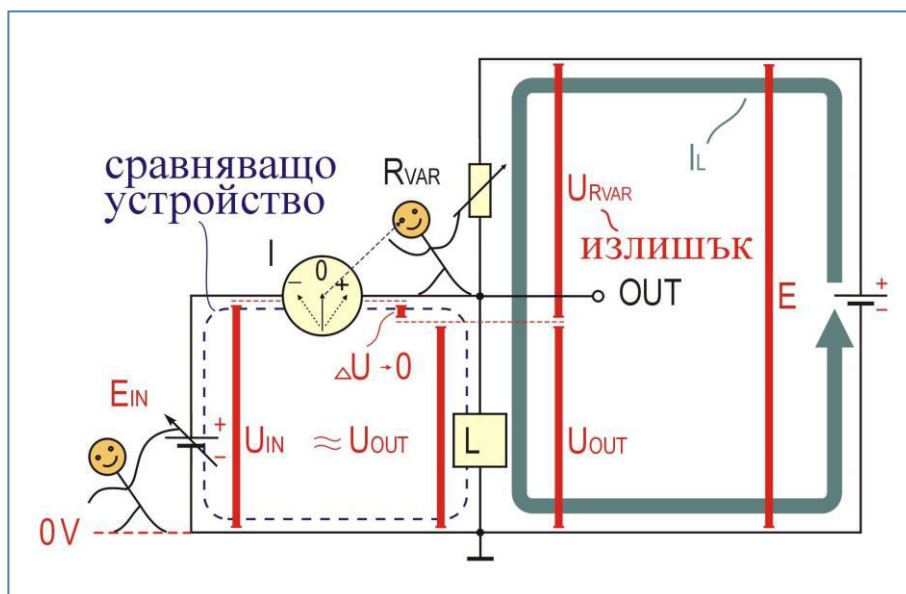
Фиг. 3.106. Двумерен съпротивителен елемент („потенциометър”), направен от токопроводяща пореста материя („дунапрен”)

Екстравагантни резистивни елементи. В ролята на високоомни съпротивления може да се използват дебело начертани с мек графитен молив линии върху хартия и дори... човешкото тяло. За целта студентът просто се хваща за две точки от схемата и като променя променя силата на натиска, регулира съпротивлението в границите от няколко до няколкостотин килоома. Това всъщност е и идеята на някои видове сензорни бутони.

3.4.5.2. Ръчно-управлявани активни елементи.

Евристичният подход предполага широкото използване на емпатията (персоналната аналогия) с цел дълбокото разбиране на действието на електронните схеми. За целта, активните елементи се емулират от човек, който управлява по подходящ начин резистивен елемент (казано просто, човек се вживява в ролята на активен елемент).

Така например, подобно на шеговитата илюстрация на Хоровитц (показана в увода), транзисторът може да се емулира просто с един реостат, съпротивлението на който се командва от човек. Например, на фиг. 3.107 е показана схемата на един такъв „ръчно-управляван” повторител на напрежение. Като движи плъзгача на реостата в съответната посока така, че нулевият индикатор да показва нула, напрежението в изхода на схемата повтаря входното напрежение. Изисква се само входната величина да се променя бавно, за да може човекът-изпълнител да отработва промяната. За целите на доброто разбиране, това закъснение е желано (реалните електронни елементи отработват промяната почти моментално и това пречи на разбирането).



Фиг. 3.107. Постановка за емулиране на транзистор (човек + реостат = транзистор), включен в схема на емитерен повторител.

4. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЕВРИСТИЧНИЯ ПОДХОД В СХЕМОТЕХНИКАТА

4.1. ЕВРИСТИЧЕН КУРС ПО СХЕМОТЕХНИКА

1. ТРАДИЦИОННИЯТ ПОДХОД

В схемотехническите дисциплини се чувства особено силно нуждата от "качествени" методи за анализ. Математическият модел, използван от формалните методи, описва обектите в един компактен, удобен предимно за запис и манипулиране вид. Той скрива структурата на устройствата, причинно-следствените връзки в тях и връзката "структура - функция". Поради тези причини, математическото уравнение не може да служи като изходна точка в процеса на изучаване и конструиране на едно устройство, защото разкрива количествените, но скрива качествените му характеристики.

2. ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ НА ЕВРИСТИЧНИЯ КУРС

"ИЗОБРЕТЯВАНЕ". Фундаменталната идея, залегнала в предлагания курс, е евристичното излагане на материала. Знанията не се поднасят "наготово", в техния завършен и окончателен вид, а се "изобретяват" в момента, с активното участие на студентите. Така те вникват дълбоко в същността на явленията, осъзнават смисъла на техническите решения и си изработват евристично мислене. Това им позволява не само да анализират действието на електронните устройства, но и да създават, синтезират, а защо не и наистина да ги изобретяват?

Така например, от основната електрическа верига на Ом [51] могат се "изобретяват" шест пасивни аналогови устройства: преобразувателите напрежение-ток, съпротивление-ток, ток-напрежение, съпротивление-напрежение; делителят напрежение/ток; умножителят ток $\times$ съпротивление. Реалните електрически вериги на Тевенен и Нортън дават идеята за делител на напрежение и ток. От разклонените вериги на Кирхоф по естествен начин се получава паралелният суматор на токове и последователният суматор на напрежения. Реактивните елементи кондензатор и бобина пък изпълняват ролята на интегратори на ток и напрежение и т.н.

ПОСТРОЯВАНЕ. Елементарните електрически устройства се използват като своеобразни "кубчета" за "построяване" на по-сложните електронни устройства. Така например, един паралелен суматор на напрежения се "сглобява" от елементарните електрически *преобразуватели напрежение-ток, токов суматор и преобразувател ток-напрежение* (т. 2.2.2). По-късно към него се прибавя един операционен усилвател и се получава *идеален суматор на напрежения*. Интеграторът на напрежение пък се "построява" от елементарните електрически *преобразуватели напрежение-ток и интегратор ток-напрежение*, а диференциаторът на напрежение - от *диференциатор напрежение-ток и преобразувател ток-напрежение*, след което схемите се усъвършенстват с помощта на операционен усилвател (т.

3.1.1.1). Така че, електронните устройства трябва да се разглеждат като усъвършенствани електрически аналогови устройства.

АСОЦИИ. При изобретяването на устройствата се търсят асоциации с добре познати от ежедневието житейски ситуации (т. 3.3.3) Тези аналогии на електрическите явления и устройства служат като своеобразни "опори", с помощта на които естествено придобитите знания за видимите явления от живота се пренасят върху невидимите, абстрактни електрически явления. Така например, при "изобретяването" на елементарните електрически устройства и транзисторните усилватели, може да се използват "флуидни" аналогии (пневматическа, хидравлическа, топлинна, дифузионна и др). Блоквата схема на система с отрицателна обратна връзка може да се получи чрез индуктивно обобщаване на "автомобилни" (поддържане на скорост, дистанция и направление), тегловни, акустически, икономически, социални и други аналогии.

В лабораторните занятия на предлагания курс се използват интерактивни ("живи") аналогии, идеята на които е следната. С помощта на подходяща аналогово-цифрова периферия към изследвания обект се свързва персонален компютър. Под управление на съответното програмно осигуряване върху екрана на монитора се изобразява аналогия на изследваното електрическо явление, която реагира адекватно на промените в изследвания обект и засилва асоциациите с него. Така например, при изследване на елементарните електрически преобразуватели, на екрана се изобразява интерактивна работна точка, образувана от пресичането на две "живи" волт-амперни характеристики. Устройствата паралелен суматор на напрежения и инвертиращ усилвател се представят върху екрана чрез интерактивна потенциална диаграма, която илюстрира разпределението на потенциалите по дължината на резистивния слой. Когато пък се изследва един аналогово-цифров преобразувател, на екрана се изобразява "жива" механическа везна, чието положение и големина на теглата от двете ѝ страни зависят от подаденото входно напрежение и получения цифров код.

ФУНКЦИОНАЛНА ПРЕДСТАВА. Устройствата и елементите се разглеждат на функционално ниво (набляга се не толкова на вътрешното им устройство, а на тяхното поведение в изследваната схема), като функцията, която изпълнява даден елемент, определя и неговото име. Представен по този начин, транзисторът е източник на ток, преобразувател напрежение-ток или ток-ток, сравняващо устройство, регулиращ елемент, операционният усилвател - регулируем източник на напрежение и т.н.

Функцията, която изпълнява даден елемент, определя и неговото име. Така например, един променлив резистор може да изпълнява функцията на потенциометър (делител на напрежение, преобразувател напрежение-напрежение), преобразувател преместване-

напрежение, аналогов умножител [61]. Инвертиращият усилвател пък може да се използва като стабилизатор, преобразувател съпротивление-напрежение, умножител, делител и др., а матрицата $R-2R$ - като преобразувател напрежение-ток, преобразувател код-ток или цифрово-управляван резистор.

ПРИЧИНА - СЛЕДСТВИЕ. В процеса на "изобретяване" на устройствата в предлагания курс се разкриват причинно-следствените връзки в изследваните явления (всяка една промяна се разглежда като следствие от някаква причина, която я е предизвикала). Това се постига с изкуствено разделяне, забавяне или ускоряване на процеса във времето ("кинематографично" разгъване) – т. 3.3.1. Например, при промяна на входното напрежение (причината) на един инвертиращ усилвател с отрицателна обратна връзка, операционният усилвател започва да изменя изходното си напрежение (следствието) в съответната посока, докато възстанови равновесието на системата (т. 2.1.2). Обратно на това, при класическия, статичен анализ на схемата се приема, че входното и изходното напрежение на операционния усилвател се изменят едновременно, което не позволява студентите да "почувстват" действието на схемата.

ВАРИРАНЕ. Една голяма част от устройствата в предлагания курс се "изобретяват" чрез комбиниране и вариране с параметрите на изследвания обект (т. 2.3.2). В поредица от опити се избират последователно независима и зависима променлива като останалите величини се поддържат неизменни. След това се варира с независимата и се наблюдава поведението на зависимата променлива. Като правят такива отделни "сечения" на изследвания обект, студентите "реверсират" и комбинират причинно-следствените връзки между отделните величини, получават нови гледни точки и проникват дълбоко в същността на нещата. Така например, ако се приеме, че в основната електрическа верига напрежението поражда тока (обичайната причинно-следствена връзка) и се варира с величините напрежение и съпротивление, се получават споменатите вече преобразуватели напрежение-ток, съпротивление-ток и делителя напрежение/ток. Обратно, ако се приеме, че токът поражда напрежението (обръща се причинно-следствената връзка) и се варира с величините ток и съпротивление, се получават останалите преобразуватели (ток-напрежение, съпротивление-напрежение и умножителя ток $\times$ съпротивление). Чрез същите похвати цифрово-аналоговият преобразувател се превръща в програмируем усилвател и умножител, а аналогово-цифровият преобразувател - в измервател на отношение и цифрова схема "следене-запомняне".

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. В сравнение с аналитичното и словесното представяне, образното е изключително пластично, свободно и по-подходящо за качествено разглеждане. За това винаги, когато това е било възможно в предлагания евристичен курс, абстрактните електрически величини са представяни "образно" чрез аналогични на тях пространствени, геометрични

величини (т. 3.2). "Височинната" представа за електрическите величини потенциал и напрежение е типичен пример на такава геометрична интерпретация (предпочитаме да казваме, че напрежението се повишава/понижава вместо увеличава/намалява). Използва се например при построяване на потенциални диаграми и за визуализиране на напрежителни падове в елементите на транзисторните усилвателни стъпала с помощта на потенциални "стълбчета". "Флуидната" представа за електрическия ток пък служи за изграждане на картина на токовете в изследваната схема.

СЕНЗОМОТОРНИ ПРЕДСТАВИ. Разгледаните принципи се използват за изграждане на сензомоторни (кинестетични) представи у студентите, при които се извършват поредица от двигателни актове върху изследваната схема и се възприемат сетивно реакциите ѝ на тези въздействия. Удобни за това са "живите" обекти (анalogии, потенциални "стълбчета" и диаграми, графични волт-амперни характеристики – т. 3.2.4), които отразяват върху екрана състоянието на изследвания обект.

За да се "почувства" действието на по-абстрактните електронни устройства, те може да се емулират "ръчно" и след това да се "проиграе" еволюцията им до напълно автоматични. Така например, ролята на операционен усилвател в схемите с отрицателна обратна връзка може да се изпълнява първо от "ръчно-управляван източник на напрежение", след това от персонален компютър с входно-изходна аналогова периферия и подходящо програмно осигуряване, и накрая от реален операционен усилвател. По този начин, като се "проиграва" реално еволюцията на една електронна схема от "ръчна" до напълно автоматична, човекът се отъждествява мислено с изследвания обект (персонална аналогия, емпатия), представя си как върши неговите функции и така разбира още по-добре действието му.

Сензомоторни представи можем да се изграждат дори с помощта на мислени експерименти. Така например, схема общ емитер може да се изследва като мислено се "повдига" и "спуска" потенциала на базата на транзистора, при схема обща база се "движи" потенциала на емитера, а при диференциалния усилвател - и двете едновременно.

РАЗЛИЧНИ ГЛЕДНИ ТОЧКИ. Този подход разширява, обобщава и затвърдява представите на студентите за електронните аналогови устройства. Например, инвертиращия усилвател се представя като: инвертираща схема с отрицателна обратна връзка, преобразувател напрежение-напрежение, последователно свързани преобразуватели напрежение-ток и ток-напрежение, преобразувател съпротивление-напрежение, умножител, стабилизатор и т.н.

3. СЪДЪРЖАНИЕ НА ЕВРИСТИЧНИЯ КУРС.

Разкрива се в три логически свързани части [51]. В първата се "изобретяват" най-елементарните пасивни аналогови устройства (аналогова електротехника). Втората част е

посветена на електронните аналогови устройства без отрицателна обратна връзка ("нежива" електроника). В последната част на курса ("жива" електроника) върху пасивните аналогови устройства се прилага феномена на отрицателната обратна връзка и те се "прераждат" в активни.

4. ПРИЛОЖЕНИЕ.

Елементи на евристичният курс са използвани в занятията по *Аналогова схемотехника* още през 1986 г., а в пълния му вариант е провеждан от началото на 90-те години. За първи път е докладван на конференция през 1987 г. [51]. От 2000 г. се развива в интернет, първоначално на сайта circuit-fantasia.com. След това, през 2007 г., някои елементи са отразявани в Wikipedia, а през 2008 занятията по *Специализирана компютърна електроника* са напълно отразени в електронната книга *Circuit idea* в Wikibooks. Връзки към всички тези ресурси, както и пълни материали, са поставени и на платформата *E-learning* на катедра КС на ТУ, София.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

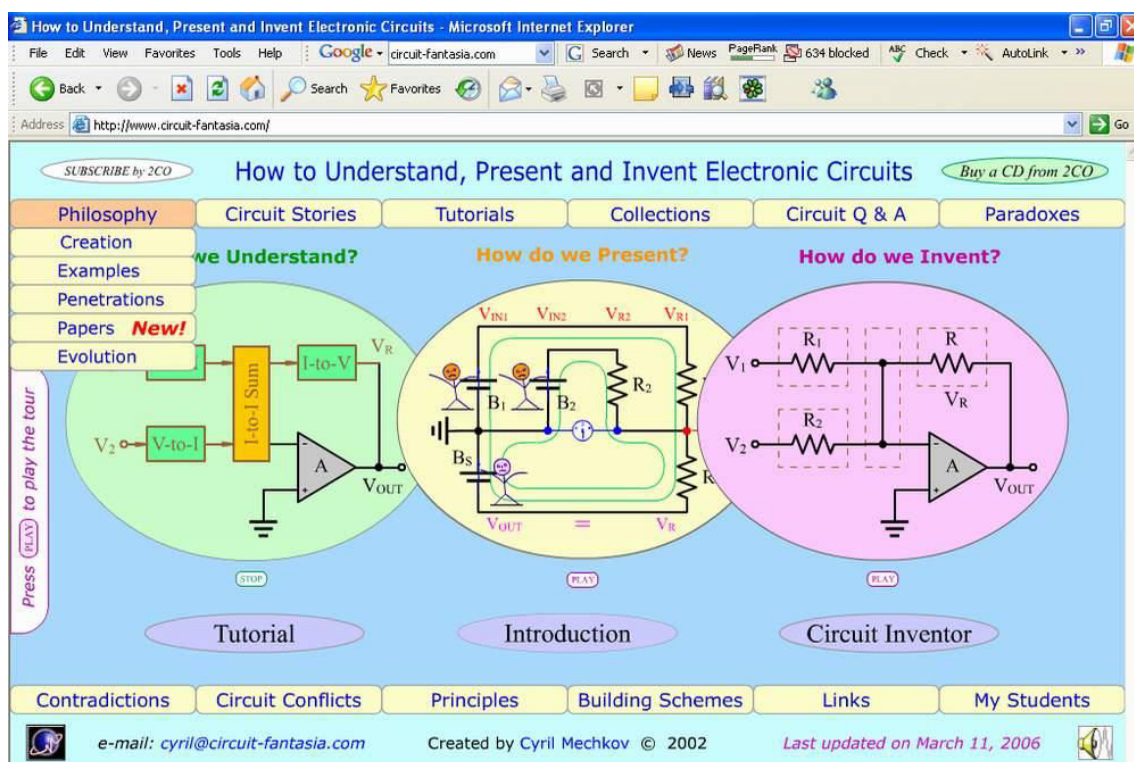
Евристичният курс илюстрира възможностите на един системен подход в областта на схемотехниката. Използваните методи позволяват електронните устройства да бъдат "изобретени" по един естествен и понятен за човешкото мислене начин. Те не дават готова информация, а формират мисловния "инструментариум" на студентите.

4.2. УЕБ САЙТ „КАК ДА РАЗБИРАМЕ, ПРЕДСТАВЯМЕ И ИЗОБРЕТЯВАМЕ ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ” (<http://www.circuit-fantasia.com>)

4.2.1. СЪЩНОСТ

Сайтът е създаден от автора през 2002 г. и се допълва и усъвършенства непрекъснато. На него са разположени евристични инструментални средства за реализиране на една подчинена на човешкото въображение и интуиция образователна технология за обучение в областта на електронната схемотехника. Предназначен е за студенти и преподаватели с творческо мислене, които не се задоволяват с общоприетите формални обяснения на феномените в електронната схемотехника. Схемите се разглеждат от три гледни точки (мисловни дейности):

1. *Разбиране* на непознати схеми (ориентирано към студентите).
2. *Представяне* на разбраните схеми (предназначено главно за преподавателите).
3. *Изобретяване* на нови електронни схеми (насочено към творчески мислещите студенти и преподаватели).



Фиг. 4.1. Началната страница на уеб сайта „Как да разбираме, представяме и изобретяваме електронни схеми”, разположен на адрес <http://www.circuit-fantasia.com>.

4.2.2. РЕАЛИЗАЦИЯ

Изпълнен е като мултимедиен продукт, който съдържа интерактивни илюстрации, Flash анимации, текст и звук, интегрирани в едно цяло чрез продуктите на Macromedia. Навигацията е изпълнена с падащи менюта.

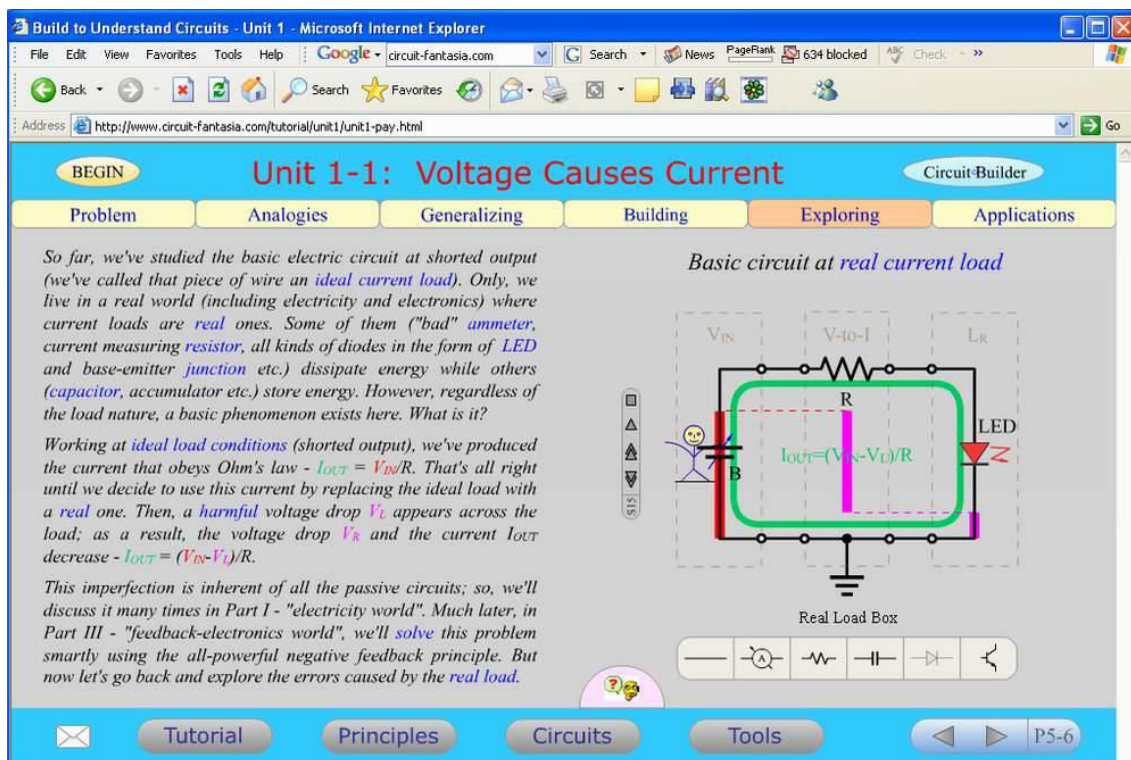
4.2.3. СТРУКТУРА

Състои се от 12 части, по-важните от които са: обща част („философия”), схемни „истории” (мини-курсове), основни курсове, колекции от различни елементи и накрая – част, посветена на студентите.

Обща част (Philosophy). В общата част се разкрива философията на евристичния подход като целта е да се мотивира читателя. Материалите разкриват смисъла от прилагането на евристичния подход в схемотехниката и проследяват неговото възникване и развитие. Авторът е показал с конкретни примери от собствения си опит как мисли в процеса на разбирането, преподаването и изобретяването на нови схеми. Като пример е разгледано подробно как авторът постепенно е осъзнал идеята на активната компенсация чрез прилагане на паралелна отрицателна обратна връзка в схемите. Тази идея е обобщена по-късно в настоящата работа чрез теоремата на Милър (т. 3.1.1) и в Circuit Idea

Курсове (Tutorials). Разработени са три основни курса с помощта на Macromedia Flash.

Build to understand circuits (<http://www.circuit-fantasia.com/tutorial/intro/welcome-pay.html>) е създаден с идеята да запознае читателя по един занимателен начин с идеите на електронните схеми. През 2001 г. първите модули на продукта са разположени на сайта на списанието Poptronics (наследникът на Popular Electronics) и остават там до неговото закриване през 2002 г.



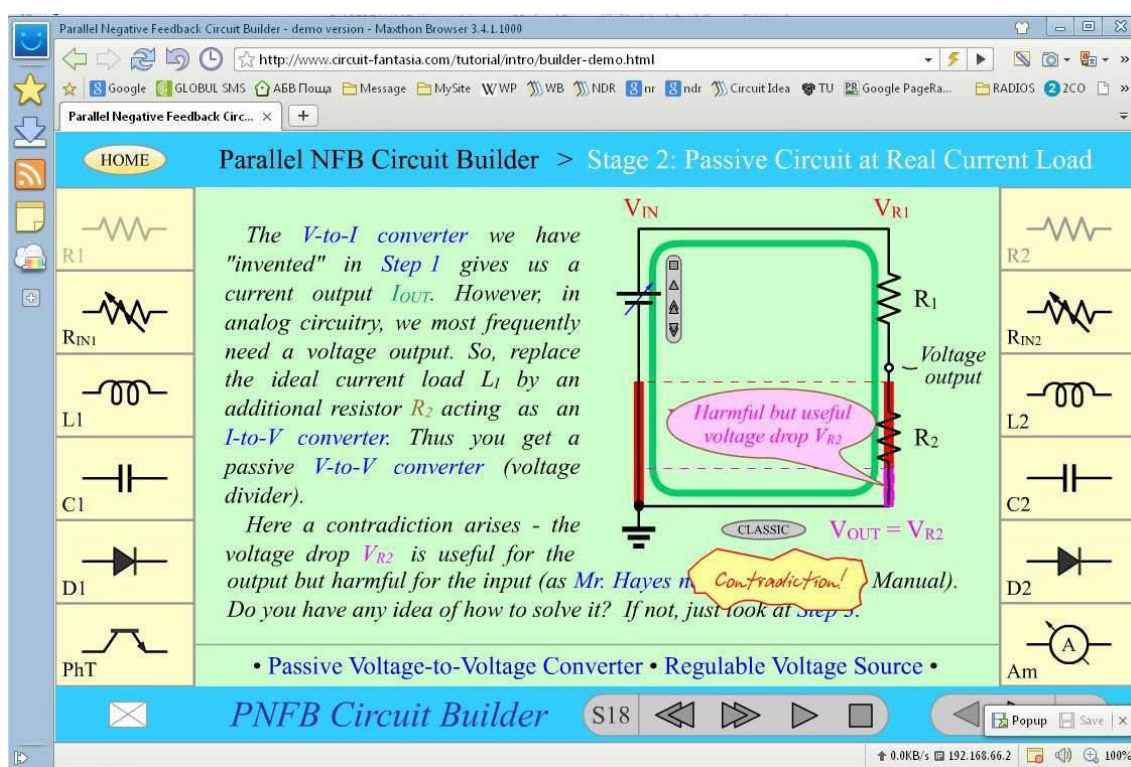
Фиг. 4.2. Изследване с интерактивни средства на пасивния преобразовател *напрежение-ток*, „изобретен” в курса *Build to understand circuits*.

В продукта са използвани максимално възможностите на *Macromedia Flash* за анимации и звукови ефекти. Всяка една от схемите е представена последователно в следните шест етапа:

- Поставяне на проблема, който трябва да се реши
- Търсене на решение чрез намиране на подходящи житейски ситуации (анalogии)
- Обобщаване на проблема в най-общ принцип и функционална блок-схема
- Построяване на схемата стъпка по стъпка
- Изследване на схемата чрез интерактивни мултимедийни средства
- Намиране на приложения в различни области на схемотехниката

Така например, на фиг. 4.2 е показан модула, посветен на пасивния преобразувател *напрежение-ток*. Под анимираната схема има малка библиотека от елементи, които при кликане върху тях „прелитат” и „кацат” на мястото на светодиода LED.

Circuit builder (<http://www.circuit-fantasia.com/collections/tools/pnfb-builder.html>) е създаден през 2002 г. Показва в интерактивен вид как всяка една пасивна схема може да се преобразува в активна схема с паралелна отрицателна обратна връзка [47].

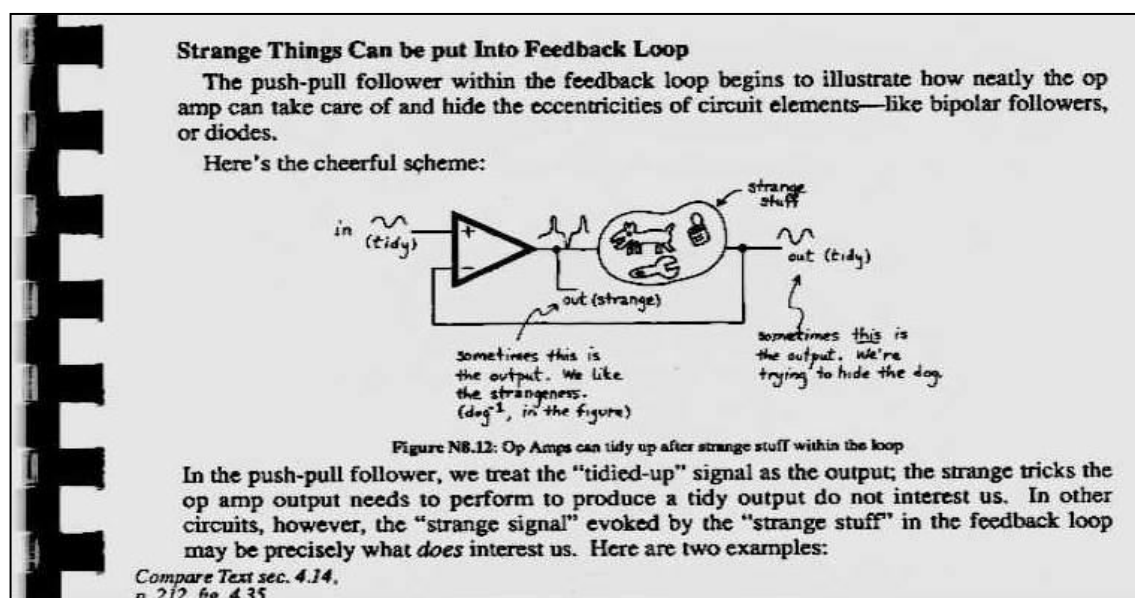


Фиг. 4.3. Построяване на преобразувател *напрежение-напрежение* (на етап *пасивен преобразувател*) в интерактивния строител *Circuit builder*.

В първата част на този интерактивен „строител” се разкрива философията на това преобразуване. След това може да се избере различна пасивна схема и да се преобразува в четири последователни стъпки в активна схема (елементите на схемата се избират от две

библиотеки, разположени отстрани на екрана) – фиг. 4.3. Тези възможности са реализирани с помощта на интерактивните възможности на *Action script*.

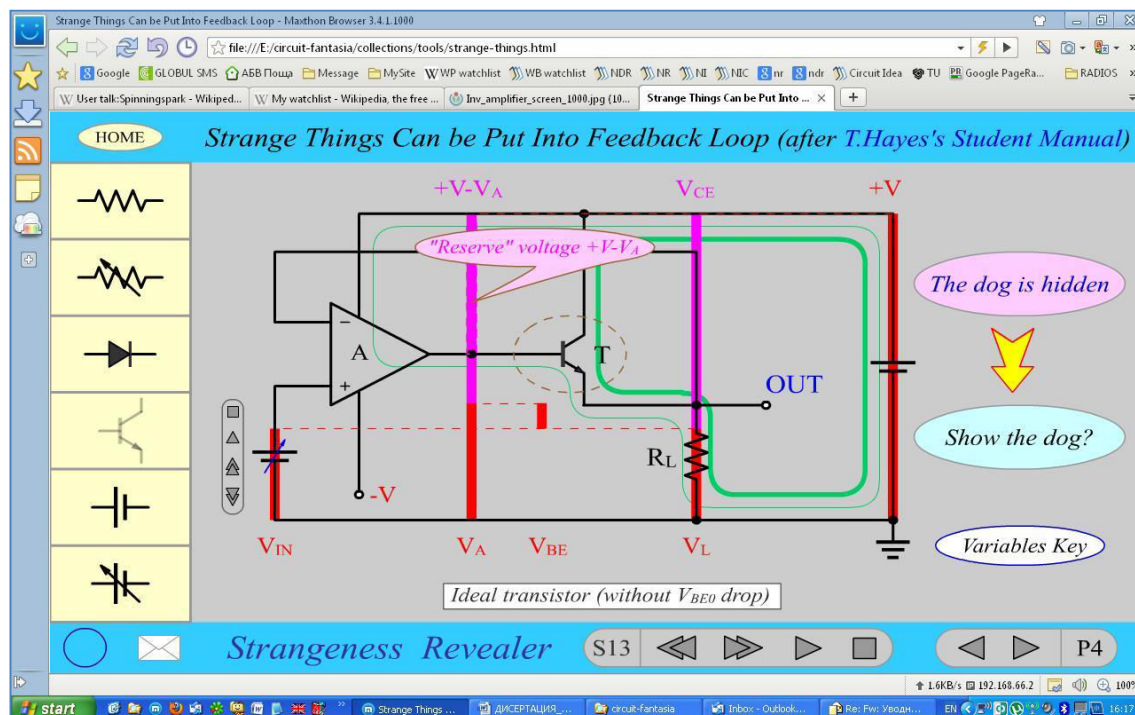
Strange things (<http://www.circuit-fantasia.com/collections/tools/strange-things.html>) е създаден върху основата на една забавна илюстрация (фиг. 4.4) от ръководството за лабораторни упражнения на Tom Hayes *Student manual for the Art of electronics* [21– стр. 173], където той е направил гениални заключения относно основното свойство на системите с отрицателна обратна връзка да потискат нежелани смущения. „Гениалността” се състои в твърдението на автора, че смущенията могат да бъдат и полезни и на това се основават много известни схеми с операционни усилватели. Историята на тази работа е интересна с това, че впечатлен от оригиналността на идеята и вдъхновен от интерактивните възможности на Flash, авторът на настоящата работа я пресъздава в един мултимедиен филм и я подарява на автора ѝ Tom Hayes.



Фиг. 4.4. Изследване с интерактивни средства как отрицателната обратна връзка компенсира адитивни смущения (напрежението V_{BE} в случая).

Както в по-горната програма, различните „смушващи” елементи се избират от библиотека, разположена в лявата част на екрана (фиг. 4.5).

Построителният курс по аналогова схемотехника [52] е многоцветен, но изпълнен като стандартен pdf файл. Съдържа общо 17 отделни статии, посветени на различни схемни феномени в следните области: пасивни резистивни схеми, транзисторни активни схеми без обратна връзка, схеми с отрицателна обратна връзка, реализирани с операционни усилватели.

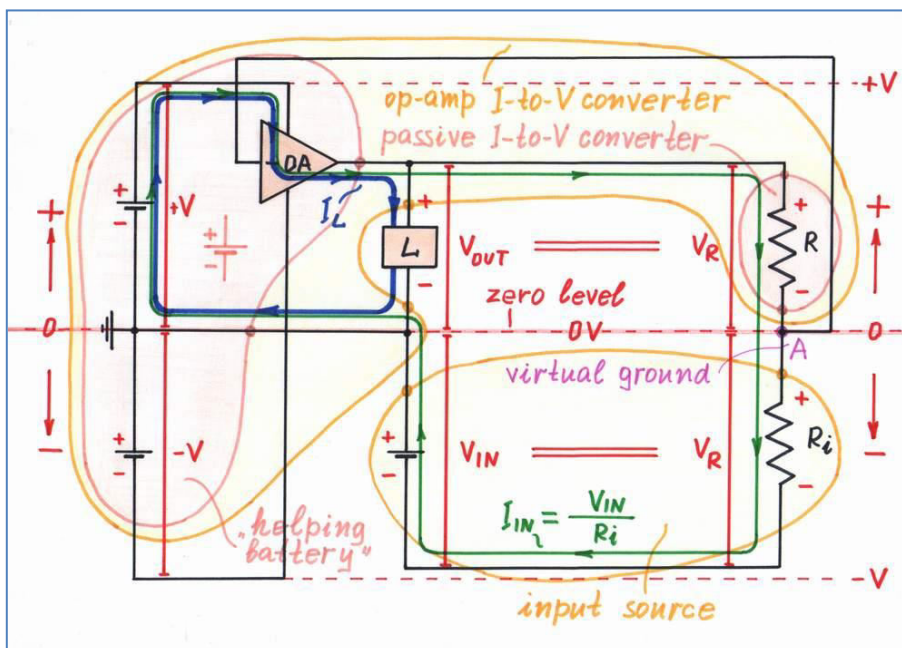


Фиг. 4.5. Изследване с интерактивни средства как отрицателната обратна връзка компенсират адитивни смущения (напрежението V_{BE} в случая).

Схемни истории върху бялата дъска (Circuit Stories on the Whiteboard) съдържа набор от мини-курсове, в които всяка една от схемите се разглежда от три гледни точки – разбиране, построяване и изобретяване. Тези своеобразни „приказки“ са извлечени от занятията на автора със студентите и образно казано, отразяват начертаното върху бялата дъска в залата и лабораторията. Въпреки, че някои от илюстрациите действително представляват снимки на бялата дъска, в повечето случаи това е имитирано, като схемите са начертани ръчно с цветни флумастери върху бял лист. Това създава илюзията, че са начертани върху бяла дъска. На фиг. 4.6 е показана една примерна схема на преобразувател *ток-напрежение*, визуализирана с напрежителни стълбчета и токови контури, която е изпълнена по тази технология.

Схемните истории са направени като поредица от кадри на филмова лента с навигационна лента на всеки кадър. По този начин идеята на схемите се разкрива последователно, стъпка по стъпка, като се показва нейната еволюция. Пример за това е историята, посветена на схемния феномен виртуална маса [53].

Колекции (Collections). Идеята на тази част е да се натрупат колекции от базови схемни принципи и отделни схемни решения. Системата от принципи е организирана йерархично чрез интерактивно меню. Направените до момента схеми представляват интерактивни мини-курсове.

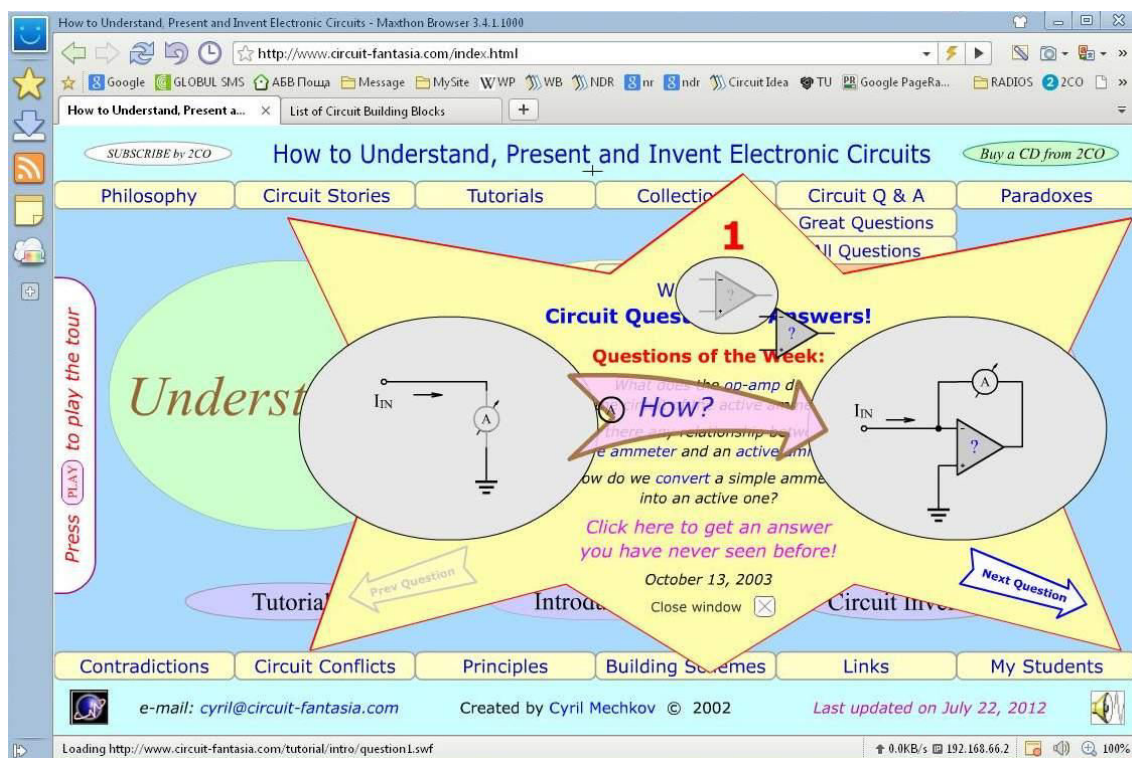


Фиг. 4.6. Колоритна схема на преобразувател ток-напрежение, визуализирана с напрежителни стълбчета и токови контури. Начертана е с цветни флумастери върху бял лист, което създава илюзията за схема, начертана върху бяла дъска.

Схемни въпроси и отговори (Circuit Q & A). Те са организирани в иерархични списъци, избирани чрез меню, при което се отваря автоматично e-mail програмата, инсталирана на компютъра на читателя. Отговорът съдържа текстово обяснение, построителен „сценарий“ на схемата, списък от връзки до други ресурси и прикрепени файлове с мултимедийни клипове. През 2003-2004 г. е поддържана седмичната рубрика *Въпрос на седмицата* (фиг. 4.7).

Колекция от базови принципи (Collections). В основата на всяка една електронна схема, колкото и сложна да е тя, стои ясна и проста фундаментална идея. Така действието на цялата съвкупност от схеми и устройства в дадена област на електрониката може да бъде обяснено с ограничен брой базови принципи. В тази част на сайта е направена колекция от такива принципи в областта на аналоговата схемотехника. Изпълнена е като йерархично интерактивно Flash меню.

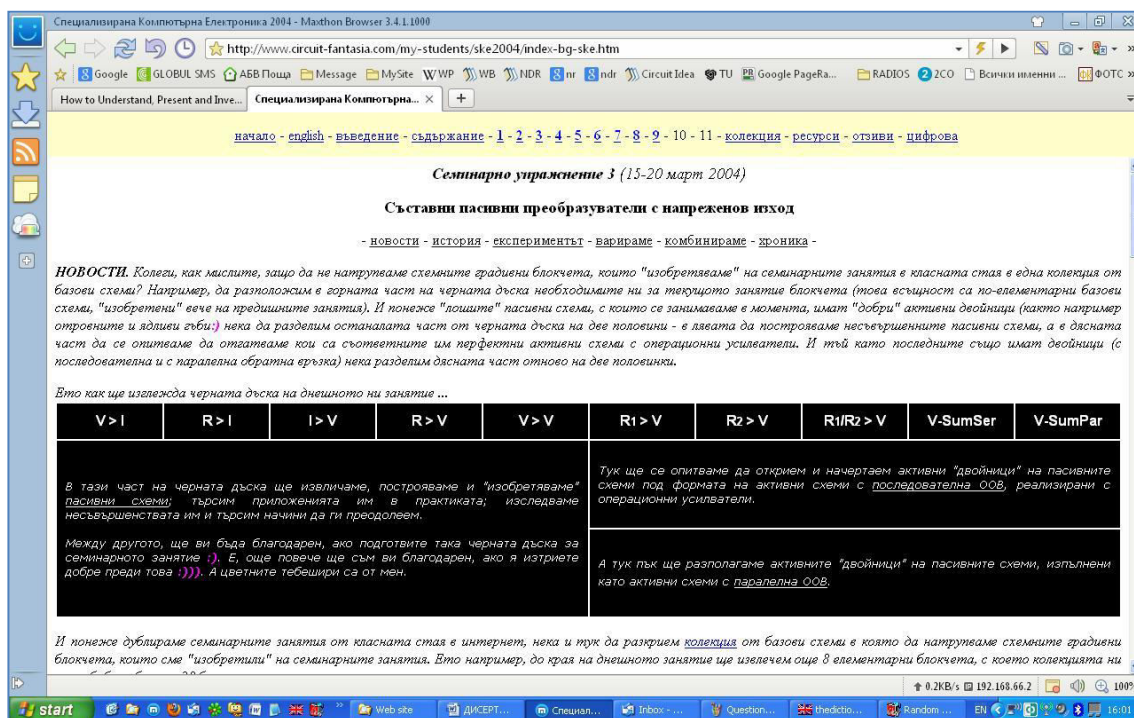
Схемни противоречия, конфликти, построителни „сценарии“ (Contradictions, Conflicts, Building schemes). Оформени са като колекции от изброените елементи и представляват различни гледни точки върху едни и същи схеми. Колекциите са отворени и подлежат на непрекъснато разширяване.



Фиг. 4.7. Когато се кликне върху бутона *Въпрос на седмицата*, върху екрана „изскача“ интересен клип, който провокира въображението на уеб посетителя чрез серия от допълнителни подбуждащи въпроси.

Студентска част (My students). Тук са разположени ресурси за студентите ми от 2004 г. насам. Отразени са подробно занятията ми по време на семинарни и лабораторни упражнения и лекции по дисциплините *Специализирана компютърна електроника* [54], *Импулсни и цифрови устройства* и *Цифрова схемотехника*. Използвани са средства за обратна връзка (html формуляри) със студентите.

Занятията на автора със студентите са отразявани от него до 2006 г. на сайта *circuit-fantasia.com* (фиг. 4.8). След това, през 2007 г., някои елементи са отразявани в Wikipedia, а през 2008 занятията по *Специализирана компютърна електроника* са напълно отразени в електронната книга *Circuit idea* на Wikibooks.



Фиг. 4.8. Семинарно упражнение по Специализирана компютърна електроника, проведено през месец март 2004 г. и отразено в интернет. Върху горната част на черната дъска са изписани „изобретените“ до момента схемни градивни блокчета на пасивни преобразуватели.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1. РЕЗУЛТАТИ

Започнала с разработването на едно учебно-техническо средство през 80-те години, продължила с разработването на една образователна технология и внедряването ѝ в учебния процес, настоящата работа накрая прераства в една философия на схемотехниката.

Предложеният евристичен подход превъзхожда традиционния аксиоматичен подход за преподаване в схемотехниката, защото дава начин за разбиране на схемите, а не просто информация за тях. Това развива продуктивното, изобретателско мислене на студентите така необходимо при конструирането на електронни схеми, и формира сложен мисловен инструментариум у тях. Стандартното формално мислене, използвано от традиционният подход, не е ефикасно в процеса на проектиране на структурата им, но все пак остава полезно за следващото оразмеряване на точните стойности на елементите в схемите.

Натрупаният опит в изследването на електронните схеми позволява да се твърди, че предложеният евристичен подход е универсален и може да се пренесе и в други сродни области на техническото образование.

5.2. БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ

Настоящата работа само очертава насоките, в които да се прилага и развива по-нататък евристичният подход в схемотехниката.

По отношение на *съдържанието*, предстои да се разшири колекцията от базови евристични принципи, стоящи в основата на аналоговите електронни схеми с отрицателна и положителна обратна връзка, цифровите и аналогово-цифровите схеми. Също така, евристичният подход ще бъде експериментиран и в областта на микропроцесорната техника.

По отношение на *изпълнението*, предстои текстовите и илюстративни материали от настоящата работа да се преведат на английски и да се вмъкнат в електронната книга *Circuit idea* като след това работата ще продължи там.

5.3. МОИТЕ ПОСТИЖЕНИЯ:

1. Разкрита е базовата идея на теоремата на Милър. Разкрита е същността на феномена абсолютно отрицателно съпротивление. Формулирани са 12 принципа за модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез включване на допълнителни източници.
2. Разкрита е същността на феномена диференциално отрицателно съпротивление и са формулирани 6 принципа за модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез динамизация на импеданса им.
3. Формулирани са още 6 принципа за изграждане на схеми чрез взаимодействащи си електрически източници.
4. Разработена е *технология за опериране* с базови електронни схеми, включваща операциите функционален анализ, представяне и синтез
5. Разработена е *колекция от евристични средства*, включваща базови схемотехнически принципи, визуализиращи и технически средства.
6. С помощта на тези евристични средства са *обработени* значителен брой аналогови, цифрови и хибридни електронни схеми като са разкрити базовите идеи, върху които са изградени тези схеми.
7. Разработените средства са *приложени в учебната дейност* за целите на базовите схемотехнически дисциплини като е изграден *построителен курс по аналогова схемотехника* и е разработена универсална *дидактическа среда* за провеждане на учебни лабораторни експерименти.
8. Създадени и поддържани (с участието на студентите) са *уеб страници*, отразяващи резултатите от прилагането на евристичния подход в схемотехниката (circuit-fantasia.com, Wikipedia). Създадена и поддържана е електронната книга [Circuit Idea](#) в Wikibooks.

5.3. ПРИНОСИ

5.4. БЛАГОДАРНОСТИ.

Много хора и институции са ме подкрепяли в това начинание, започнало през 80-те години, на които искам да изразя благодарност (в хронологичен ред):

- доц. д-р Васил Василев (починал), бивш титуляр на дисциплината „Аналогова схемотехника”, за съдействието му при решаването на техническите и организационни задачи, свързани със създаването на система МИКРОЛАБ и внедряването ѝ в учебния процес на ръководената от него дисциплина
- инж. Евгени Чолаков, написал основната част от програмата МИКРОЛАБСКОП през лятото на 1986 г.
- проф. д-р Георги Попов (кат. "Информационни технологии в индустрията" на Технически университет, София), за дейното му участие още като студент от 1985 г. в изграждането на система МИКРОЛАБ, внедряването ѝ в учебния процес и популяризирането на образователната технология МИКРОЛАБ през 80-те години
- инж. Нико Пехливанов, разработил части от програмното осигуряване на система МИКРОЛАБ през 1987 г.
- инж. Светослав Найденов, написал програмното разширение МИКРОЛАБ БЕЙСИК през 1988 г., на основата на което по-късно бяха създадени множество компютъризирани лабораторни експерименти
- инж. Живко Жеков, участвал активно в апаратната част на системата и внедряването ѝ в производство, както и в създаването на допълнителни модули към нея. Изказал е много ценни идеи, които са повлияли на автора в творческото му развитие
- доц. д-р Дилян Гюров (кат. Компютърни науки на Кралски технологичен институт, Стокхолм) за активното му съдействие още като студент от 1987 г. в първоначалното осъзнаване и следващото развитие на евристичния подход чак до сега. Редица ценни негови идеи и мисли, изказани в множество съвместни разговори, са намерили място в настоящата работа;
- студентите от проблемна група МИКРОЛАБ, които с много ентузиазъм участваха във внедряването на образователната технология МИКРОЛАБ в учебния процес през 80-те години

- проф. д-р Ангел Писарев (починал), ръководител на програмата за компютъризация на образованието на страните, членки на СИБ, за оказаната помощ в популяризирането на образователната технология МИКРОЛАБ извън страната в края на 80-те години
- проф. д.п.н. Боян Лалов (Инженерно-педагогически факултет на Технически университет, София), за активното му съдействие още от началния етап (1988 г.) на зараждането на евристичните идеи чак досега. Оказал е изключително силно влияние върху развитието на автора в тази насока, като редица негови ценни идеи са намерили пряко приложение в настоящата работа
- инж. Радослав Стоилов, активно участвал в провеждането на курса „Електроника за изобретатели” в Техникума по съобщенията, София, през началото на 90-те. По-късно, след 2000 г., е оказал активна помощ на автора в пренасянето на дейността му в интернет като и в момента продължава да сътрудничи
- инж. Любен Георгиев (издател) за съдействието му при отпечатването на поредицата В търсене на идеята в сп. Инженеринг ревю в края на 90-те години
- Аля Левкова (бивш преподавател по английски език в ТУ София), за ентусиазираната ѝ помощ, оказана на автора при усвояването на английски език до степен да излага свободно идеите си в интернет
- студентите от Факултета по компютърни системи, които участваха в отразяването в Wikibooks на занятията по "Специализирана компютърна електроника" през 2004 г. (circuit-fantasia.com > My Students > 2004) и 2008 г. (Wikibooks)
- доц. д-р Валентин Моллов, активно подпомагал автора в процеса на прилагането на евристичния подход в областта на цифровата схемотехника и подтикнал го да започне докторантура;
- най-близките за мене хора, които ме подкрепяха през цялото това време и ме вдъхновяваха в стремежа да разкривам тайните на електронните схеми
- ръководството на катедра КС и факултета ФКСУ, както и на Техникума по съобщителна техника и Техникума по ядрена енергетика, гр. Козлодуй
- всички мои колеги и студенти, оказали съдействие за възникването и развитието на този евристичен подход в схемотехниката

6. ЛИТЕРАТУРА

6.1. ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА

1. Mechkov C. Parallel negative feedback circuit builder. *Proceedings of The Twelfth Int. Conference ELECTRONICS'2003*, Sozopol.
2. Mechkov C. Investigating, presenting and building electronic circuits with dynamic load by using the heuristic principle of the conflict. The 2nd Int. Conference Computer science' 2005, Halkidiki, Greece, 2005.
3. Mechkov C. Improving the heuristic conflict principle, in order to apply to electronic circuits with controlled dynamic load. The 2nd Int. Conference Computer science' 2005, Halkidiki, Greece, 2005.
4. Mechkov C. A heuristic approach to teaching negative resistance phenomenon. COMPUTER SCIENCE' 2006, Istanbul, Turkey.
5. Мечков, К. Система от евристични принципи за модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез теоремата на Милър. Computer & Communications Engineering. Vol. 5. No. 2/2011.

6.2. ЦИТИРАНИ ИЗТОЧНИЦИ В РАБОТАТА

- [1] [Why Circuit Ideas are Hidden](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Why_Circuit_Ideas_are_Hidden)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Why_Circuit_Ideas_are_Hidden)
- [2] [Heuristic](http://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic) (<http://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic>)
- [3] МИКРОЛАБ – интелигентна система за провеждане на лабораторни упражнения (проспект). Булгарреклама, София, 1988.
- [4] Цонев, М. Методи за техническо творчество. Техника, София, 1986.
- [5] [Brainstorming](http://en.wikipedia.org/wiki/Brainstorming). Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Brainstorming>
- [6] Osborn, A.F. (1963) *Applied imagination: Principles and procedures of creative problem solving* (Third Revised Edition). New York, NY: Charles Scribner's Sons.
- [7] [Synectics](http://en.wikipedia.org/wiki/Synectics). Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Synectics>
- [8] Gordon, William J.J. *Synectics: The Development of Creative Capacity*. (New York: Harper and row, Publishers, 1961)
- [9] [Empathy](http://en.wikipedia.org/wiki/Empathy). Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Empathy>
- [10] [Lateral thinking](http://en.wikipedia.org/wiki/Lateral_thinking). Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Lateral_thinking
- [11] [TRIZ](http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm_of_Inventive_Problems_Solving) (http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm_of_Inventive_Problems_Solving)
- [12] [ARIZ](http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm_of_Inventive_Problems_Solving#ARIZ_-_algorithm_of_inventive_problems_solving) ([http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm_of_Inventive_Problems_Solving#ARIZ - algorithm of inventive problems solving](http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm_of_Inventive_Problems_Solving#ARIZ_-_algorithm_of_inventive_problems_solving))
- [13] Altshuller, Genrich. [40 Inventive Principles](#).
- [14] Лалов, Б. Функционалният подход в обучението по електротехника, електроника, автоматика и информатика. Технически университет, София, 2004.
- [15] Рут-Бърнстийн, С. Откриване на изкуството в науката. Сайънсиз, Ню Йорк, 1990.
- [16] Hornak, T. 1991. *True analog circuit design, (Analog circuit design: art, science and personalities)*. Jim Williams, page 59.
- [17] Becker, J., M. Yiannos. [Computer-aided 3D animation of analog circuits](#). EWME 2006, Stockholm, Sweden. <http://micropci1.imtek.uni-freiburg.de/svs/>
- [18] Darling, R. [IVmaps](#). IEEE. <http://www.ewh.ieee.org/soc/es/May2001/16/Begin.htm>
- [19] Айзберг, Е. Радиото ли? Че то е много просто! София, Техника, 1962.
- [20] Йомишен, Ж. Електрониката ли? Нищо по-просто! Техника, София, 1969.
- [21] Horowitz, P., H. Winfield. [The art of electronics](#). Cambridge university press. http://en.wikipedia.org/wiki/The_art_of_electronics
- [22] Hayes, T. [Student manual for the Art of electronics](#). Cambridge university press. <http://frank.harvard.edu/aoe/sm/index.htm>
- [23] Шишков, А. Полупроводникова техника (част втора). Техника, София, 1981.
- [24] Kuphaldt, T. [Lessons in electric circuits](http://openbookproject.net/electricCircuits). <http://openbookproject.net/electricCircuits>
- [25] Kuphaldt, T. [Socratic electronics](http://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic). <http://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic>
- [26] [Presenting the Op-amp Inverting Current-to-Voltage Converter in a More Attractive Manner](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Op-amp_Inverting_Current-to-Voltage_Converter_Visualized)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Op-amp_Inverting_Current-to-Voltage_Converter_Visualized)

-
- [27] [Voltage-to-voltage active summer](http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/v-to-v-active-sum-old.html)
(<http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/v-to-v-active-sum-old.html>)
- [28] [Колекция от схемни градивни блокчета](http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2004/intro/library-bg.htm)
(<http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2004/intro/library-bg.htm>)
- [29] [Miller theorem](http://en.wikipedia.org/wiki/Miller_theorem) (http://en.wikipedia.org/wiki/Miller_theorem)
- [30] [Potentiometer \(measuring instrument\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer_(measuring_instrument)#Constant_current_potentiometer)
([http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer_\(measuring_instrument\)#Constant_current_potentiometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer_(measuring_instrument)#Constant_current_potentiometer))
- [31] Мечков, К. Система от евристични принципи за модифициране на характеристиките на електронните елементи чрез теоремата на Милър. Computer & Communications Engineering. Vol. 5. No. 2/2011.
- [32] Mechkov C. [A heuristic approach to teaching negative resistance phenomenon](http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2006/paper.htm). COMPUTER SCIENCE' 2006, Istanbul, Turkey.
(http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2006/paper.htm)
- [33] [Op-amp Inverting Voltage-to-Current Converter](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Op-amp_Inverting_Voltage-to-Current_Converter)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Op-amp_Inverting_Voltage-to-Current_Converter)
- [34] [Current-to-voltage converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Current-to-voltage_converter)
(http://en.wikipedia.org/wiki/Current-to-voltage_converter)
- [35] [Gyrator](http://en.wikipedia.org/wiki/Gyrator) (<http://en.wikipedia.org/wiki/Gyrator>)
- [36] [How to compensate resistive losses by series connected negative resistors](http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/inventing_circuits/ser_nr_comp/ser_neg_res_comp.htm) (http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/inventing_circuits/ser_nr_comp/ser_neg_res_comp.htm)
- [37] [Negative-resistance load canceller helps drive heavy loads](http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?AD=1&ArticleID=4128)
(<http://www.elecdesign.com/Articles/Index.cfm?AD=1&ArticleID=4128>)
- [38] [Revealing the Mystery of Negative Impedance](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Revealing_the_Mystery_of_Negative_Impedance#Voltage-driven_negative_impedance_elements_2)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Revealing_the_Mystery_of_Negative_Impedance#Voltage-driven_negative_impedance_elements_2)
- [39] [Howland current source for grounded load](http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/understanding_circuits/current_source/howland_current_source/howland_current_source.htm) (http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/understanding_circuits/current_source/howland_current_source/howland_current_source.htm)
- [40] Mechkov C. [Investigating, presenting and building electronic circuits with dynamic load by using the heuristic principle of the conflict](http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2005/paper1.htm). The 2nd Int. Conference Computer science' 2005, Halkidiki, Greece, 2005. (http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2005/paper1.htm)
- [41] [Revealing the Truth about ECL Circuits](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Revealing_the_Truth_about_ECL_Circuits)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Revealing_the_Truth_about_ECL_Circuits)
- [42] [Emitter-coupled logic](http://en.wikipedia.org/wiki/Emitter-coupled_logic) (http://en.wikipedia.org/wiki/Emitter-coupled_logic)
- [43] [Transistor-transistor logic](http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor-transistor_logic) (http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor-transistor_logic)
- [44] Mechkov C. [Improving the heuristic conflict principle, in order to apply to electronic circuits with controlled dynamic load](http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2005/paper2.htm). The 2nd Int. Conference Computer science' 2005, Halkidiki, Greece, 2005. (http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2005/paper2.htm).
- [45] [Voltage-to-current passive converter](http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/v-to-i-old.html)
(<http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/v-to-i-old.html>)
- [46] [Current-to-voltage passive converter](http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/i-to-v-old.html) (page P6-5)
(<http://www.circuit-fantasia.com/collections/circuit-collection/circuits/old-circuits/i-to-v-old.html>)

-
- [47] [Build to understand, present and invent circuits](http://www.circuit-fantasia.com/tutorial/unit1/unit1.html)
(<http://www.circuit-fantasia.com/tutorial/unit1/unit1.html>)
- [48] Mechkov C. [Parallel negative feedback circuit builder](http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/et_2003/builder/builder.pdf). *Proceedings of The Twelfth Int. Conference ELECTRONICS'2003*, Sozopol.
(http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/et_2003/builder/builder.pdf)
- [49] [Walking along the Resistive Film](http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Walking_along_the_Resistive_Film#How_to_visualize_the_voltage_diagram_on_the_screen)
(http://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Idea/Walking_along_the_Resistive_Film#How_to_visualize_the_voltage_diagram_on_the_screen)
- [50] Мечков, К. Система за провеждане на компютризирани учебни лабораторни експерименти ДИДАЛАБ. Техникум по съобщенията, София, 1993.
- [51] [Специализирана компютърна електроника](http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2005/lectures/lectures_contents_bg.htm) (съдържание на лекционните занятия)
http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2005/lectures/lectures_contents_bg.htm
- [52] [Построителен курс по аналогова схемотехника](http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2005/short_tutorial/short_tutorial.pdf)
http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2005/short_tutorial/short_tutorial.pdf
- [53] How do we create a virtual ground?
http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/inventing_circuits/virtual_ground/virtual_ground.htm
- [54] [Семинарни упражнения по дисциплината Специализирана компютърна електроника](http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2004/intro/intro-ske.htm), 2004.
<http://www.circuit-fantasia.com/my-students/ske2004/intro/intro-ske.htm>